

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M.Eng.

PAR
PHILIPPE TERRIER

INFLUENCE DE L'UTILISATION DU BIOCARBURANT E85 SUR LES
ÉMISSIONS POLLUANTES D'UN VÉHICULE HYBRIDE ÉLECTRIQUE

MONTRÉAL, LE 26 AVRIL 2005

© droits réservés de Philippe Terrier

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Henri Champlaud, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Patrice Seers, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Hallé, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Anh Dung Ngo, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 19 AVRIL 2005
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

INFLUENCE DE L'UTILISATION DU BIOCARBURANT E85 SUR LES ÉMISSIONS POLLUANTES D'UN VÉHICULE HYBRIDE ÉLECTRIQUE

Philippe Terrier

SOMMAIRE

Des solutions technologiques telles que les véhicules hybrides électriques ou l'utilisation de biocarburants nous offrent des avenues vers un transport moins dommageable pour l'environnement. La technologie hybride s'inscrit dans la perspective de diminution de la consommation de carburant des véhicules. Les biocarburants permettent de réduire les émissions polluantes rejetées par les véhicules à moteurs thermiques. La combinaison de ces deux technologies est envisagée dans ce mémoire.

La présente étude est réalisée principalement sur la base de simulations à l'aide de modèles informatiques. Ces modélisations nous permettent de prévoir la quantité d'émissions polluantes rejetées lors de l'utilisation d'un véhicule hybride électrique alimenté avec un carburant fossile, l'octane, puis avec un biocarburant, le E85, durant les cycles FTP et US06. Une amélioration de la stratégie hybride du véhicule est proposée pour exploiter pleinement le potentiel du biocarburant et réduire les émissions polluantes. Nous avons évalué les gains apportés par les modifications successives du véhicule: la conversion du moteur pour une alimentation avec un biocarburant, l'amélioration du rapport volumétrique et de l'avance à l'allumage, la modification de la stratégie hybride et enfin, la variation de la masse du véhicule.

Lors du passage de l'octane vers le E85, la réduction des émissions se situe entre 20.9 % et 76 %, selon le polluant et le cycle considéré. Dans le même temps, la consommation de carburant augmente d'environ 35 % à cause du faible pouvoir calorifique du E85. Le changement de carburant est le facteur le plus influent sur la variation des émissions polluantes. La masse du véhicule joue aussi un rôle important alors que les modifications successives tant du moteur que de la stratégie hybride présentent une influence d'ordre secondaire.

INFLUENCE OF USING THE E85 BIOCARBURANT ON THE POLLUTANT EMISSIONS OF AN ELECTRIC HYBRID VEHICLE

Philippe Terrier

ABSTRACT

Technological solutions such as the hybrid electric vehicles or the use of biofuel offer solutions to reduce the environmental impact of the automobile. Hybrid technology falls under the prospect of fuel consumption reduction of the vehicles, while biofuel makes it possible to reduce the pollutant emissions rejected by the engine. The combination of these two technologies is considered in this dissertation.

The present study is carried out mainly on the basis of simulation using data-processing models. The model enables us to quantify the pollutant emissions rejected by an hybrid electric vehicle supplied with fossil fuel, octane, and with a biofuel, E85, on the FTP and US06 cycles. An improvement of the hybrid strategy of the vehicle will be proposed to fully exploit the potential of biofuel to reduce pollutant emissions. We evaluated the advantages of successive modifications to the vehicle which included: the conversion of the engine to biofuel; the adjustments of the compression ratio and spark timing of the engine, modifications of the hybrid strategy, and finally, the influence of the mass of the vehicle.

When switching from octane to E85 biofuel, the reduction of the emissions ranges between 20.9 % and 76 %, according to the pollutant and the standard cycle considered. In the same time, fuel consumption increase by about 35 %. The fuel change is the most influential factor on the variations of pollutant emissions. The mass of the vehicle also plays a significant role whereas the successive modifications to the engine and to the hybrid strategy present a less significant influence.

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

En période de pointe, chaque matin, plus de 300 000 déplacements en automobile sont effectués sur l'île de Montréal et le secteur du centre ville en comptabilise à lui seul environ 70 000 (Ville de Montréal, 1998). L'utilisation de l'automobile comme moyen de transport a ses raisons. L'étalement urbain en est certainement une des principales. De plus, le transport en commun, bien que moins polluant, ne répond pas aux attentes de tous les usagers et ce, bien que son coût d'utilisation reste bien inférieur à celui d'une automobile. Aux États-Unis et au Canada, l'industrie automobile représente 14 % de l'activité économique pour l'année 2002. Plus de 250 millions de véhicules légers sont en circulation dans ces deux pays (H.L. MacLean & L. B. Lave, 2003). Ces chiffres indiquent clairement que l'automobile fait partie du paysage urbain et plus largement de notre style de vie.

L'automobile est une source importante de pollution de l'air et donc un acteur de premier plan dans le contexte du protocole de Kyoto. Ce protocole recommande une réduction moyenne des émissions de gaz à effet de serre de -5.5 % en deçà du niveau de 1990 (Ministère de l'environnement du Québec, 2003). Il est généralement reconnu que les transports motorisés, automobiles et camions lourds confondus, sont responsables d'environ 40 % des gaz à effet de serre (Société Transport Montréal, 2003). Les émissions polluantes occasionnées par les voitures sont souvent concentrées dans les zones fortement peuplées, comme le centre des grandes villes, posant alors un problème

de santé publique. Pour limiter le préjudice environnemental et sanitaire, il devient nécessaire de proposer des véhicules moins polluants et offrant une alternative réelle aux voitures traditionnelles. C'est entre autres cet objectif que visent les fabricants de véhicules hybrides électriques. Cependant, bien que sensibilisés aux problèmes de pollution atmosphérique, les consommateurs ne sont pas toujours prêts à dépenser plus d'argent pour une automobile moins dommageable pour l'environnement. Les véhicules alternatifs restent en effet plus onéreux et sont souvent moins performants que les véhicules traditionnels.

L'évaluation d'une solution technologique de remplacement devrait inclure l'empreinte écologique et le cycle de vie complet du produit pour être représentative. Dans le domaine des véhicules routiers, l'approche du puits à la roue (well-to-wheel), pour évaluer l'empreinte écologique, consiste à prendre en compte toutes les étapes permettant de réaliser le produit, depuis l'extraction de la matière première, en passant par la production de l'énergie pour le procédé de fabrication, jusqu'à la puissance délivrée aux roues du véhicule. Cependant de telles études, souvent issues de synthèses de travaux approfondis d'un des aspects, sont longues et difficiles à réaliser. Au cours de ce projet, nous nous limiterons à l'évaluation de l'utilisation du bioéthanol (E85) dans un véhicule hybride électrique afin de réduire les émissions polluantes. À notre connaissance, les recherches faites à ce jour ne concernent que l'étude séparée des biocarburants ou des véhicules hybrides comme solutions aux problèmes des émissions polluantes du secteur automobile.

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, M. Henri Champliand, ainsi que mon co-directeur de recherche, M. Patrice Seers pour avoir accepté mes propositions de recherche et m'avoir accordé confiance, financement et soutien scientifique tout au long de ce projet. Ce fut un réel plaisir de travailler sous votre gouverne !

J'adresse mes remerciements à l'École de technologie supérieure pour le support financier et technique octroyé par le biais de bourses, de locaux et d'équipements m'ayant permis d'étudier dans des conditions d'une qualité rare.

Je remercie mes amis proches pour toutes les activités divertissantes que j'ai partagés en leur compagnie.

Finalement, je remercie ma famille ainsi que Mélanie Mailhot pour leur présence et leur aide sous tant de formes que je ne peux les citer toutes ici.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|---|------|
| SOMMAIRE..... | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS..... | vi |
| TABLE DES MATIÈRES..... | ix |
| LISTE DES TABLEAUX..... | xii |
| LISTE DES GRAPHIQUES..... | xiii |
| LISTE DES FIGURES..... | xv |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES..... | xvi |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE..... | 3 |
| 1.1 Véhicule hybride électrique : le deux en un..... | 4 |
| 1.1.1 Présentation de la Toyota Prius, hybride de référence..... | 4 |
| 1.1.2 Littérature sur la Toyota Prius | 9 |
| 1.1.3 Gestion des stratégies hybrides sur véhicules hybrides électriques..... | 12 |
| 1.2 Les biocarburants : une source d'énergie renouvelable..... | 14 |
| 1.2.1 L'éthanol : un substitut à l'essence | 14 |
| 1.2.2 Effets de l'éthanol sur les émissions polluantes | 14 |
| 1.2.3 Bilan énergétique de l'éthanol | 16 |
| 1.3 Conclusion, objectifs et contributions attendues | 16 |
| CHAPITRE 2 INFORMATIONS TECHNIQUES..... | 18 |
| 2.1 Véhicules hybrides..... | 18 |
| 2.1.1 Hybrides série et parallèle..... | 18 |
| 2.1.2 Stratégies d'hybridation des véhicules hybrides électriques | 20 |
| 2.2 Caractéristiques du moteur thermique sélectionné | 23 |
| 2.3 Présentation des carburants..... | 24 |
| 2.4 Présentation du logiciel de simulation Ricardo Wave | 25 |
| 2.4.1 Définition du modèle simulé à l'aide de Wave..... | 29 |
| 2.4.2 Prédiction des émissions polluantes à l'aide de Wave..... | 29 |
| 2.5 Cycles d'essais routiers normalisés | 32 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2.5.1 | Cycle FTP75 | 32 |
| 2.5.2 | Cycle US06 | 33 |
| 2.6 | Présentation du logiciel ADVISOR (Advance Vehicle Simulator) | 34 |
| 2.7 | Organisation de la recherche | 37 |
| | | |
| CHAPITRE 3 | SIMULATION D'UN MOTEUR ALIMENTÉ À L'OCTANE ET AU BIOCARBURANT E85 | 39 |
| 3.1 | Présentation des simulations réalisées avec Wave | 41 |
| 3.2 | Vérification du modèle défini avec Wave | 41 |
| 3.3 | Alimentation du moteur thermique à l'octane. | 42 |
| 3.4 | Alimentation du moteur thermique au E85 | 43 |
| 3.5 | Élaboration des tables d'émissions polluantes. Octane et E85 | 45 |
| 3.6 | Comparaison des performances des carburants | 48 |
| 3.7 | Bilan du chapitre 3 | 51 |
| | | |
| CHAPITRE 4 | SIMULATION D'UN VÉHICULE HYBRIDE ÉLECTRIQUE ALIMENTÉ À L'OCTANE PUIS AU E85 SUR DES CYCLES ROUTIERS NORMALISÉS | 53 |
| 4.1 | Simulation du véhicule sur les cycles FTP et US06 | 54 |
| 4.2 | Comparaison et analyse des résultats | 55 |
| 4.2.1 | Influence des modifications successives apportées au véhicule | 56 |
| 4.2.2 | Rôle de l'avance à l'allumage | 58 |
| 4.2.3 | Rôle du rapport volumétrique | 59 |
| 4.2.4 | Émissions de CO ₂ | 59 |
| 4.2.5 | Véhicule simulé par rapport aux véhicules polycarburants | 60 |
| 4.3 | Bilan du chapitre 4 | 61 |
| | | |
| CHAPITRE 5 | ÉTUDE DES STRATÉGIES D'HYBRIDATION D'UN VÉHICULE HYBRIDE ÉLECTRIQUE ALIMENTÉ À L'OCTANE ET AU E85 SUR LES CYCLES FTP ET US06 | 63 |
| 5.1 | Présentation des paramètres de gestion de la stratégie hybride | 63 |
| 5.2 | Influence des paramètres de la stratégie hybride sur les émissions polluantes et la consommation de carburant | 65 |
| 5.2.1 | Véhicule alimenté à l'octane | 67 |
| 5.2.2 | Véhicule alimenté au E85 | 74 |
| 5.2.3 | Comparaison et analyse des résultats | 79 |
| 5.3 | Influence de la masse du véhicule sur les émissions polluantes | 82 |
| 5.4 | Bilan du chapitre 5 | 84 |

| | |
|--|-----|
| CONCLUSION | 89 |
| RECOMMANDATIONS | 92 |
| COMMUNICATION ET PUBLICATION | 93 |
| ANNEXES | |
| 1 : Modélisation d'un véhicule avec ADVISOR | 94 |
| 2 : Équation de combustion et rapport stœchiométrique. Octane et E85 | 99 |
| 3 : Cartographies d'émissions et de consommation. Octane et E85 | 102 |
| 4 : Influence de l'allumage et du rapport volumétrique sur les émissions.... | 108 |
| 5 : Émissions polluantes lors des modifications du véhicule.Cycle FTP. | 110 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 112 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|---------------|--|
| Tableau I | Mode de fonctionnement de la Toyota Prius.....7 |
| Tableau II | Caractéristiques de la Toyota Prius9 |
| Tableau III | Comparaison des systèmes hybrides série et parallèle 19 |
| Tableau IV | Caractéristiques du moteur simulé24 |
| Tableau V | Propriétés des carburants.....25 |
| Tableau VI | Émissions spécifiques pour l’octane 43 |
| Tableau VII | Émissions spécifiques pour le E8545 |
| Tableau VIII | Débit de CO en g/s. Alimentation à l’octane.....47 |
| Tableau IX | Émissions et consommation de carburant. FTP. Octane et E85.....55 |
| Tableau X | Émissions et consommation de carburant. US06. Octane et E85 55 |
| Tableau XI | Variation émissions et consommation. Passage octane vers E8560 |
| Tableau XII | Paramètres généraux de la stratégie hybride 64 |
| Tableau XIII | Paramètres de la stratégie hybride à évaluer65 |
| Tableau XIV | Présentation des simulations66 |
| Tableau XV | Classement des paramètres de la stratégie hybride66 |
| Tableau XVI | Choix de cs_target_soc. Octane71 |
| Tableau XVII | Choix de cs_eng_on_soc. Octane.....72 |
| Tableau XVIII | Variations liées à la modification de la stratégie hybride. Octane.73 |
| Tableau XIX | Choix de cs_target_soc. E8576 |
| Tableau XX | Choix de cs_eng_on_soc. E8578 |
| Tableau XXI | Variations liées à la modification de la stratégie hybride. E85.....79 |
| Tableau XXII | Comparaison des émissions et de la consommation pour véhicules à stratégie hybride modifiée. Octane et E85. Cycles US06 et FTP.....80 |

LISTE DES GRAPHIQUES

| | Page |
|---|------|
| Graphique 1 Cycles et profondeur de décharge des batteries | 21 |
| Graphique 2 Comparaison des courbes de puissance | 42 |
| Graphique 3 Représentation surfacique des émissions de CO en g/s | 48 |
| Graphique 4 Couple en fonction du régime pour octane et E85 | 50 |
| Graphique 5 PME en fonction du régime pour octane et E85 | 51 |
| Graphique 6 Influence des paramètres du moteur sur les émissions polluantes et la consommation pour Octane et E85. Cycle US06 | 57 |
| Graphique 7 Influence des paramètres du moteur sur les émissions polluantes et la consommation pour Octane et E85. Cycle FTP | 58 |
| Graphique 8 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_target_soc</i> . Cycle US06. Octane | 68 |
| Graphique 9 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_target_soc</i> . Cycle FTP. Octane | 69 |
| Graphique 10 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_eng_on_soc</i> . Cycle US06. Octane | 70 |
| Graphique 11 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_eng_on_soc</i> . Cycle FTP. Octane | 70 |
| Graphique 12 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_target_soc</i> . Cycle US06. E85 | 75 |
| Graphique 13 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_target_soc</i> . Cycle FTP. E85 | 76 |
| Graphique 14 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_eng_on_soc</i> . Cycle US06. E85 | 77 |
| Graphique 15 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de <i>cs_eng_on_soc</i> . Cycle FTP. E85 | 77 |
| Graphique 16 Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction la masse du véhicule. Cycle US06. | 83 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Graphique 17 | Variations de consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction la masse du véhicule. Cycle FTP..... | 84 |
| Graphique 18 | Influence des modifications successives apportées au véhicule sur les émissions polluantes et la consommation de carburant. Cycle US06 ... | 87 |

LISTE DES FIGURES

Page

| | | |
|-----------|---|----|
| Figure 1 | Train planétaire de la Toyota Prius..... | 5 |
| Figure 2 | Transmission hybride de la Toyota Prius..... | 6 |
| Figure 3 | Coupe d'un moteur 4 cylindres à 4 temps | 23 |
| Figure 4 | Fenêtre de définition des paramètres de combustion dans Wave | 28 |
| Figure 5 | Paramètres géométriques et émissions polluantes | 30 |
| Figure 6 | Cinétique chimique de la formation des HC..... | 31 |
| Figure 7 | Cycle FTP-75 | 33 |
| Figure 8 | Cycle US06 | 33 |
| Figure 9 | Schéma bloc ADVISOR | 35 |
| Figure 10 | Fenêtre de sélection des caractéristiques du véhicule à simuler | 36 |
| Figure 11 | Illustration des modélisations réalisées au cours du projet..... | 37 |
| Figure 12 | Vue en coupe de la circulation des gaz dans un moteur | 46 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

| | |
|------------------------|---|
| cs_hi_soc | État de charge niveau haut des batteries du véhicule |
| cs_lo_soc | État de charge niveau bas des batteries du véhicule |
| cs_target_soc | Valeur moyenne pour l'état de charge des batteries du véhicule |
| cs_electric_launch_spd | Vitesse en dessous de laquelle le véhicule fonctionne seulement en propulsion électrique |
| cs_max_fc_spd | Vitesse maximale de rotation du moteur thermique |
| cs_max_gc_spd | Vitesse maximale de rotation du moteur électrique |
| cs_min_pwr | Puissance en dessous de laquelle le moteur thermique est arrêté |
| cs_eng_on_soc | État de charge des batteries en dessous duquel le moteur thermique doit être mis en route |
| cs_eng_min_spd | Vitesse de rotation minimale du moteur thermique en dessous de laquelle il doit être arrêté |
| cs_clt_tmp | Température en dessous de laquelle le moteur thermique est maintenu en fonctionnement pour le réchauffement des différents systèmes |
| CO | Monoxyde de carbone |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone |
| E85 | Carburant constitué de 85 % d'éthanol et de 15 % d'essence ou d'octane. (% volumique) |
| FFV | Flexible Fuel Vehicle (véhicule poly-carburant) |
| FTP | Federal Test Procedure |
| GES | Gaz à effet de serre |
| HC | Hydrocarbures imbrûlés |
| NREL | National Renewable Energy Laboratory |
| NO _x | Oxydes d'azote |

| | |
|----------------|----------------------------------|
| O ₂ | Oxygène |
| PME | Pression moyenne effective |
| SULEV | Super Ultra Low Emission Vehicle |
| THS | Toyota Hybrid System |
| VHE | Véhicule hybride électrique |

INTRODUCTION

Pour tenter d'endiguer le problème de pollution atmosphérique, certains manufacturiers ou acteurs du secteur de l'automobile, ont envisagé plusieurs solutions. Les véhicules électriques purs, les véhicules hybrides électriques, la propulsion par piles à hydrogène ou encore les biocarburants, apparaissent comme les options les plus prometteuses. Malheureusement, les batteries constituent le point faible des véhicules électriques purs. Ces accumulateurs électrochimiques d'énergie demeurent trop chers, présentent une autonomie limitée, et engendrent un coût environnemental pour leur fabrication et leur recyclage.

Les véhicules à hydrogène sont aussi confrontés à de nombreux problèmes. Le stockage sécuritaire de l'hydrogène ainsi que la production efficace de ce carburant ne sont pas encore adaptés pour des applications en grande série.

À court terme, les biocarburants devraient s'imposer. L'éthanol ou le biodiesel dérivés de la biomasse pourraient devenir les carburants dominants si l'indépendance énergétique, le développement durable ou la réduction des gaz à effet de serre devenaient réellement des priorités ou, encore, si le prix du pétrole augmentait.

Les véhicules hybrides électriques pourraient présenter une option intéressante pour les vingt prochaines années. Équipés de moteurs à combustion interne et alimentés par des biocarburants, ces véhicules présenteraient un compromis intéressant entre transport et réduction des émissions polluantes. Ils assureraient la transition vers de nouvelles solutions dont il est encore difficile aujourd'hui de prévoir en détail la nature.

L'étude présentée dans ce rapport traite de l'utilisation du biocarburant E85, constitué de 85 % d'éthanol et de 15 % d'octane, dans un véhicule hybride électrique afin d'évaluer les variations de consommation de carburant et des émissions polluantes. L'ensemble de

l'étude sera réalisé à l'aide de simulations pour une question de coût et de rapidité. Les logiciels Wave et ADVISOR que nous utiliserons ont permis de conduire de nombreuses études et leurs performances ne sont plus à démontrer. Nous les décrirons plus en détail au cours du présent rapport. Divisé en cinq chapitres, ce mémoire présentera un survol de la littérature connexe au domaine des véhicules hybrides et des biocarburants dans le premier chapitre. Le deuxième chapitre apportera les informations techniques facilitant la compréhension de ce projet. La modélisation ainsi que l'élaboration des cartographies d'émissions polluantes du moteur thermique alimenté au biocarburant E85 seront présentées dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre traitera de la prédiction par simulations des émissions polluantes d'un véhicule hybride électrique complet sur des cycles de conduite normalisés. Le véhicule hybride simulé à l'aide du logiciel ADVISOR sera équipé du moteur modélisé au cours du troisième chapitre. Pour terminer, le cinquième chapitre présentera les variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes d'un véhicule hybride électrique lors des actions sur les paramètres de la stratégie hybride.

À l'issue de ce travail, nous serons en mesure d'évaluer la réduction des émissions polluantes liée à l'utilisation du biocarburant E85, dans un véhicule hybride électrique « optimisé », par rapport à l'usage d'un carburant fossile conventionnel dans ce même véhicule.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans le contexte de l'augmentation de la pollution atmosphérique, des changements climatiques et de l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto, de nouvelles solutions pour un transport moins polluant ont été développées ou ont simplement connu un regain d'intérêt.

Avec pour objectifs la réduction de la consommation de carburant et des émissions polluantes, les véhicules hybrides électriques (VHE), ont émergé vers la fin des années 1990. Les VHE utilisent deux sources d'énergie, l'une électrique (batteries) et l'autre chimique (carburant). Cette association entre les moteurs thermique et électrique permet au moteur thermique de fonctionner le plus souvent possible dans des conditions de rendement optimal, avec pour avantages une diminution de la consommation de carburant et des émissions de polluants. Les VHE ont été « décortiqués », classifiés en catégorie et étudiés pour mesurer leurs performances. Aux États-Unis, le NREL - The National Renewable Energy Laboratory - a conduit de nombreux essais pour évaluer le potentiel des VHE. Les résultats d'essais du NREL ainsi que des articles et données techniques provenant des manufacturiers de véhicules hybrides serviront de base pour cette partie de la revue de littérature.

Les biocarburants, tel que l'éthanol, présentent une alternative aux carburants fossiles et un moyen de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES). Bien que le fonctionnement des moteurs à l'alcool soit connu depuis le début du 20^{ième} siècle - Ford développa un modèle T utilisant de l'alcool en 1908 - l'éthanol est redevenu populaire aux États-Unis dans les années 1970. La crise pétrolière conjuguée à la mise en place de la loi sur les émissions polluantes, le "Clean Air Act", apportèrent un regain d'intérêt pour l'éthanol. Depuis les années 80, les mélanges essence et éthanol dans des

proportions variant entre 10 % et 85 % volumique d'éthanol ont été abondamment étudiés pour évaluer leur impact sur les émissions polluantes. Parmi les articles disponibles, aucun ne fait référence, à notre connaissance, à des travaux portant sur l'utilisation de biocarburants dans un VHE. Notre étude mettra l'accent sur cet aspect afin d'évaluer les réductions d'émissions polluantes envisageables lorsque l'on utilise le E85 dans un véhicule hybride électrique.

1.1 Véhicule hybride électrique : le deux en un

Ces dernières années, un nouveau concept en matière d'automobile a vu le jour : il s'agit du véhicule hybride électrique (Jefferson & Barnard, 2002). Regroupant plusieurs technologies pour emmagasiner l'énergie et la restituer sous forme de puissance mécanique, ces véhicules combinent les avantages de la voiture électrique (pollution réduite lors de l'utilisation) à ceux de l'automobile conventionnelle (puissance et autonomie). Sous le capot d'un VHE, deux types de moteur sont installés : l'un thermique, fonctionnant souvent à l'essence, l'autre électrique alimenté par des batteries. Ces deux moteurs opèrent séparément ou simultanément, selon la demande de puissance. Cet agencement permet de réduire l'utilisation du moteur thermique, d'assurer son fonctionnement aux points de rendement élevé et de diminuer la consommation de carburant ainsi que les émissions de polluants. Dans le domaine des VHE légers, la Toyota Prius est considérée comme pionnière et référence. Voici en quelques lignes l'histoire de ce véhicule. La Toyota Prius nous servira de modèle au cours de cette étude.

1.1.1 Présentation de la Toyota Prius, hybride de référence

En décembre 1997, la compagnie Toyota commercialise au Japon la Prius, premier VHE léger. Vendu à plus de 120 000 unités à travers le monde, ce véhicule est considéré comme la référence dans le domaine des hybrides. Cette renommée est en partie

imputable au fait que la Prius puisse combiner des modes de fonctionnement allant du tout électrique au thermique assisté électriquement selon les conditions d'utilisation.

1.1.1.1 Un hybride non conventionnel

La Toyota Prius n'est ni un hybride série ni un hybride parallèle (ces deux configurations de base seront présentées au cours du chapitre 2) mais propose une combinaison des deux modes visant à faire fonctionner le moteur thermique le plus souvent possible dans sa zone de meilleur rendement. Son système de propulsion est une exclusivité développée par Toyota : le THS, pour Toyota Hybrid system. Un train planétaire permettant aux moteurs électrique et thermique de fonctionner en synergie constitue l'élément clé du système de transmission de la Prius. Ce train planétaire répartit la puissance du moteur thermique entre les roues du véhicule et une génératrice de production d'électricité selon les besoins énergétiques du véhicule. Un schéma est présenté à la figure 1

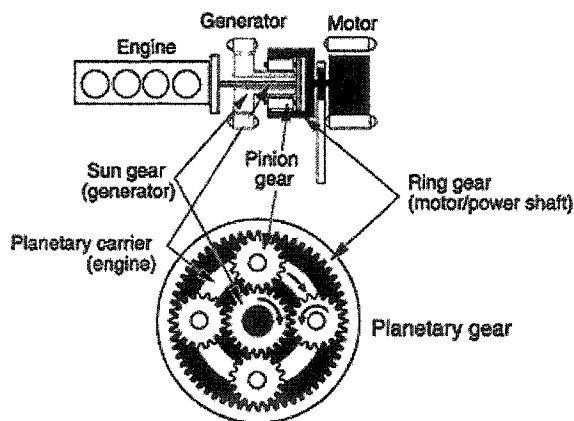


Figure 1 Train planétaire de la Toyota Prius
Source : (Toyota-Corp)

Le moteur électrique puise l'énergie dans des batteries pour fournir la puissance nécessaire supplémentaire le cas échéant. La figure 2 présente un schéma du système de transmission du véhicule.

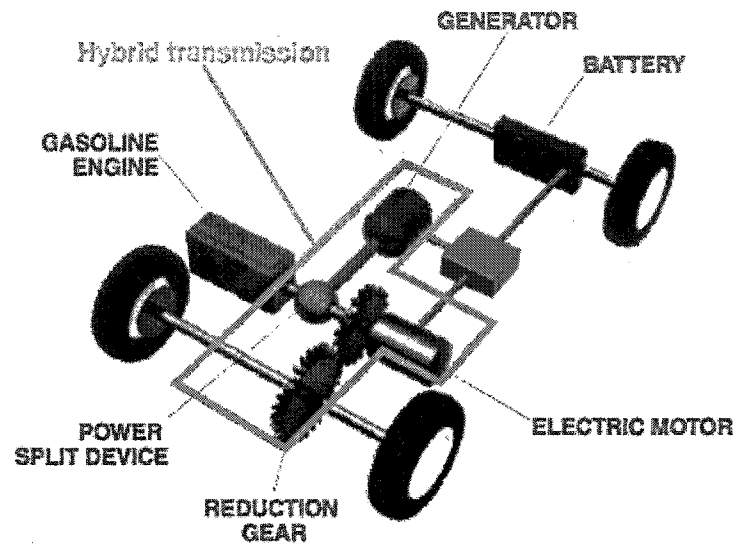


Figure 2 Transmission hybride de la Toyota Prius
Source : (Toyota-Corp)

1.1.1.2 Mode de fonctionnement de la Prius

Le contrôleur de la Toyota Prius détermine le mode de fonctionnement selon la puissance demandée et l'état de charge des batteries. Le tableau I présente les modes de fonctionnement possibles de la Toyota Prius

Tableau I

Mode de fonctionnement de la Toyota Prius

| Mode | Fonctionnement |
|-----------------|---|
| 100% électrique | Démarrage et basses vitesses : le système de contrôle évite le fonctionnement du moteur thermique dans la zone de faible efficacité tel que le démarrage, le ralenti ou les basses vitesses de déplacement du véhicule. Le véhicule est propulsé par le moteur électrique (vitesse de déplacement inférieure à 36 km/h). À l'arrêt temporaire du véhicule (embouteillage, lumière) le moteur thermique est arrêté si certaines conditions de température et de recharge des batteries sont vérifiées. En marche arrière, le fonctionnement est électrique. |
| Mode parallèle | Accélérations fortes : les moteurs thermiques et électriques fournissent leur maximum de puissance aux roues pour répondre à la demande. Le complément de puissance nécessaire à l'alimentation du moteur électrique est fourni par les batteries. |
| Mode Recharge | En régime de croisière, le moteur thermique entraîne les roues ainsi que le générateur afin de recharger les batteries. Lors du freinage ou en décélération, le moteur électrique fait office de générateur et recharge les batteries. |

Tableau I (suite)

Mode de fonctionnement de la Toyota Prius

| Mode | Fonctionnement |
|-------------------------|---|
| Mode parallèle et série | En condition normale de fonctionnement : la puissance du moteur thermique est utilisée pour entraîner le générateur qui, à son tour, alimente le moteur électrique. Le reste de la puissance entraîne les roues. Le train planétaire contrôle la répartition de puissance entre chaque composante afin de maximiser l'efficacité du véhicule. |

Ce système relativement complexe permet au moteur thermique de fonctionner le plus souvent possible au point de meilleur rendement. De plus, le régime de rotation du moteur est totalement indépendant de la vitesse de rotation des roues. C'est le train planétaire et le système de contrôle qui fixent la vitesse relative du moteur thermique par rapport au moteur électrique selon la demande de puissance.

1.1.1.3 Caractéristiques de la Toyota Prius

Le tableau II présente les caractéristiques de la Prius pour les modèles produits entre 1997 et 2003. Ce modèle est référencé dans la littérature sous le nom de THS I. À partir de 2004, Toyota a commercialisé un nouveau système de transmission, le THSII, plus efficace que le THS I. Ce système est installé sur la seconde génération de Prius. Nous n'utiliserons pas ce système lors des simulations étant donné que les informations techniques dont nous avons besoin pour la simulation sont encore peu disponibles.

Tableau II
Caractéristiques de la Toyota Prius

| Groupe technique | | Valeur |
|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Moteur thermique | Cylindrée | 1.5 litres |
| | Nombre de cylindres | 4 |
| | Puissance | 53 kW à 4500 tr/min |
| | Couple | 115 Nm à 4200 tr/min |
| Moteur électrique | Type | Moteur synchrone AC |
| | Puissance | 33 kW de 1040 à 5600 tr/min |
| | Couple | 350 Nm de 0-400 tr/min |
| Batteries | Type | Nickel Hydrure de métal (Ni-MH) |
| | Densité de puissance | 880 W/kg |
| | Capacité | 6.5 Ah |
| | Nombre | 228 |
| | Puissance maximal | 20 kW |
| | Tension | 1.2 Volts/ cellule |
| | Tension totale | 273.6 V |
| Caractéristiques générales | Masse du véhicule | 1368 kg |
| | Traînée aérodynamique | Cd=0.26 |

Tirée et adapté de (Muta, Yamazaki, & Tokieda, 2004) et (Kelly & Rajagopalan, 2001)

1.1.2 Littérature sur la Toyota Prius

De nombreuses études et articles ont été consacrés à la Toyota Prius (Duoba & Larsen, 2000; Hoogers, 2003; Kelly & Rajagopalan, 2001; Kenneth, Mihalic, & Zolot, 2002;

Muta et al., 2004). En Amérique du Nord, le NREL a conduit plusieurs recherches afin de comprendre le fonctionnement de ce véhicule hybride.

Kelly (Kelly & Rajagopalan, 2001) présente les essais réalisés par le NREL sur la Toyota Prius. Ces essais portent sur trois aspects du véhicule, à savoir la gestion thermique des batteries, l'influence des auxiliaires (air climatisée) sur la consommation de carburant et l'analyse des systèmes qui constituent le véhicule. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un dynamomètre sur les cycles normalisés suivants : FTP-75 (urbain et autoroute), US06 (conduite agressive) et SC-03 (influence du système de climatisation). Nous présenterons plus en détails ces cycles au cours du chapitre 2. Grâce à la transmission avec train planétaire, le moteur thermique de la Prius fonctionne moins fréquemment en régime transitoire. De plus, le régime du moteur de la Prius est indépendant de la vitesse de déplacement du véhicule et évolue plutôt en fonction des accélérations. Le moteur thermique sera arrêté si la vitesse du véhicule est inférieure à 36 km/h, si la charge demandée peut être fournie par le moteur électrique, si l'état de charge des batteries est d'au moins 56 % et si la température du liquide de refroidissement du moteur dépasse 75 degrés Celsius.

Sur le cycle urbain (UDDS) qui correspond aux deux premières phases du cycle FTP75, le moteur thermique de la Prius est arrêté durant 46 % du temps et 20 % des arrêts du moteur sont attribuables au fait que le véhicule s'immobilise. La Prius roule donc « tout électrique » durant 26 % du cycle UDDS. Le moteur est arrêté 4 % du temps sur le cycle HWFET (autoroute), 16 % du temps sur le cycle US06 (usage intensif). Sur le test SC03, les essais ont montré que le système d'air conditionné était responsable d'une augmentation de 30 % de la consommation de carburant.

L'ensemble des batteries de la Prius fournit une puissance de 15 à 20 kW jusqu'à atteindre un courant maximum de 2.65 Ah. La puissance sera ensuite limitée par le contrôleur pour éviter un échauffement dommageable. Afin de pallier au vieillissement prématuré des batteries lié aux décharges profondes, le système de contrôle vise un

objectif d'état de charge des batteries de 56 %. Selon l'atteinte de cet objectif, le moteur thermique sera arrêté ou maintenu en service. En plus de l'objectif d'état de charge, le contrôleur limite la décharge des batteries au seuil minimal de 40 % et la charge à un maximum de 80 % de la capacité maximale. En moyenne l'énergie puisée dans les batteries représente 3 à 10 % de celle puisée dans le carburant. La température des batteries affecte directement leurs performances en termes de puissance, de capacité et d'acceptabilité de la recharge lors d'un freinage régénératif. Pour assurer une durée de vie élevée, la température des batteries est contrôlée en permanence par l'ordinateur de la Toyota Prius.

En ce qui concerne les émissions polluantes, la Prius est homologuée SULEV (super ultra low emission vehicle). Afin de réduire les émissions de HC, ce véhicule est équipé d'une « trappe » qui piège les HC durant la mise en température du catalyseur pour les traiter par la suite.

Un véhicule conventionnel affiche un rendement de 14 % en terme d'efficacité globale du véhicule (du réservoir à la roue). Avec son système hybride la Prius atteint 28 %. Duoba (Duoba & Larsen, 2000) présente une série d'essais ayant pour but de comprendre et de cartographier le fonctionnement du moteur thermique de la Prius. Des capteurs de couple installés sur la transmission ont permis de suivre la distribution du couple durant le fonctionnement du véhicule afin de comprendre la gestion de la stratégie hybride, arrêt, marche et démarrage du véhicule ainsi que d'évaluer le rendement du moteur thermique. La plage de fonctionnement du moteur est limitée entre 1000 et 4000 tr/min, mais selon l'intensité de la demande de puissance sur le cycle d'étude (FTP, US06, Japan 10-15), le moteur fonctionnera sur une partie réduite ou sur toute sa plage de régime. Ainsi sur le cycle Japan 1015, ayant servi aux premières homologations du véhicule, le moteur thermique fonctionne dans une fenêtre de régime très réduite, bornée entre 1200 et 2200 tr/min.

Les stratégies tel que l'allumage sélectif des cylindres, lors du démarrage du moteur, ont été découvertes lors de ces essais. Ainsi lors du démarrage du moteur thermique, seul le premier cylindre est allumé puis, après un temps donné, les autres cylindres sont activés. Cette stratégie assurerait une transition douce entre la propulsion électrique et l'utilisation du moteur thermique. Le générateur électrique fait office de démarreur. Les fortes puissances et vitesses disponibles permettent ainsi au moteur thermique de tourner à plus haut régime lors de son démarrage. Les injecteurs fournissent le carburant seulement à partir de 970 tr/min et le moteur thermique fournit son propre couple à partir de 1070 tr/min. À 2763 tr/min pour un couple de 85.47 Nm le moteur thermique de la Prius a une efficacité thermique maximale de 36.4 %.

1.1.3 Gestion des stratégies hybrides sur les véhicules hybrides électriques

L'ensemble des articles consacrés à la Prius fait souvent référence à la stratégie hybride du véhicule même si ce n'est pas le but principal de l'étude. Dans la majorité des cas, la stratégie hybride est conservée dans sa configuration d'origine. Certains articles présentent des stratégies hybrides plus complexes visant à réduire les émissions polluantes. Johnson (Johnson, Wipke, & Rausen, 2000) propose une stratégie de contrôle en temps réel permettant d'optimiser l'efficacité et les émissions d'un véhicule hybride électrique à configuration parallèle. Cette étude n'est pas spécifiquement appliquée au contrôle de la Prius, mais elle offre de nouvelles possibilités. La stratégie de contrôle en temps réel sélectionne en permanence la valeur optimale du point de fonctionnement pour minimiser une fonction de coût relative à certaines grandeurs, telles que la consommation de carburant ou les émissions polluantes.

La stratégie de contrôle de base utilisée dans ADVISOR - logiciel de simulation de véhicules, que nous présenterons plus en détail au chapitre 2 - à l'image de celle utilisée dans les véhicules hybrides tend à minimiser l'utilisation du moteur sans tenir compte

des émissions. Les paramètres principaux de la stratégie hybride sont les mêmes que ceux retrouvés dans la gestion de la Prius, entre autres, l'état de charge maximal et minimal des batteries, le seuil de vitesse en dessous duquel le véhicule fonctionne tout électrique, ou encore l'objectif de charge moyen des batteries. Réduire les émissions de polluants tout en minimisant la consommation énergétique peut présenter des objectifs conflictuels. Par exemple, un point de meilleur rendement thermique pour le moteur peut générer plus de polluants qu'un point de rendement inférieur. La réduction d'un polluant peut en favoriser un autre. Diminuer les oxydes d'azote peut entraîner une augmentation du monoxyde de carbone. Sachant ceci, il faut établir une pondération sur les polluants et la consommation de carburant pour définir des priorités que la stratégie hybride s'efforcera de rencontrer. Dans son principe de fonctionnement, la stratégie de contrôle en temps réel sélectionne des points de fonctionnement et pour chacun, elle calcule l'énergie consommée par le moteur thermique ainsi que celle consommée par le moteur électrique en tenant compte des divers rendements et de la recharge des batteries. L'énergie totale consommée par le véhicule et enfin les émissions polluantes rejetées sur chaque points sont ensuite déterminées. Les pondérations affectent les valeurs calculées précédemment pour finalement sélectionner le point optimal de fonctionnement rencontrant les objectifs de la stratégie.

Simulée à l'aide d'ADVISOR lors d'un cycle FTP-HWFET sur un véhicule hybride parallèle diesel, la stratégie en temps réel a permis de diminuer les NO_x de 22.7 %, les particules de 12.9 %, les HC de 1.9 %, le CO de 0.3 % pour une augmentation de 1.4 % de la consommation de carburant (Johnson et al., 2000). Cette stratégie permet une action ciblée sur un problème précis alors que la stratégie de base habituellement utilisée assure une optimisation globale et un compromis entre les émissions et la consommation.

1.2 Les biocarburants : une source d'énergie renouvelable.

Les carburants dérivés de la biomasse, dits biocarburants, peuvent être considérés comme une énergie renouvelable (Chum & Overend, 2001; Heather L. MacLean, 2004; Watson, 1996). Leur production ne cesse d'augmenter à travers le monde. L'éthanol et le biodiesel constituent deux substituts intéressants aux carburants fossiles.

1.2.1 L'éthanol : un substitut à l'essence

Le Brésil et les États-Unis restent les plus importants producteurs d'éthanol au niveau mondial (Bronson-Consulting-Group, 2004; EurObserv'ER, 2004). Pour les moteurs à allumage commandé, le biocarburant de substitution est l'alcool nommé éthanol (C_2H_5OH). L'éthanol peut être fabriqué par fermentation des sucres - provenant de céréales comme le blé ou le maïs - à l'aide de levures. Les biocarburants se présentent comme un moyen efficace de lutter contre l'augmentation des gaz à effet de serre (Watson, 1996). Le CO_2 émis par la combustion du biocarburant a été absorbé lors de la croissance de la plante servant à élaborer le carburant. Ensuite, lors de la photosynthèse, les plantes en cours de croissance continuent leur absorption de CO_2 dans l'atmosphère (Kahn Ribeiro & Staib Younes-Ibrahim, 2001; Sagar, 1995; Wang, 1999). Le bilan global concernant les émissions est donc nul, il n'y a pas d'ajout de CO_2 dans l'atmosphère.

1.2.2 Effets de l'éthanol sur les émissions polluantes

L'éthanol est un carburant oxygéné, ce qui rend sa combustion plus complète et plus efficace, donc plus « propre » (Guibet, 1981; Guibet & Faure-Birchem, 1999). Bien des essais ont été réalisés avec des mélanges variant entre 10 % et 100 % d'éthanol (Environnement Canada; Liguang et al., 2003). La majorité montre un gain global

significatif sur le plan des émissions polluantes réglementées, telles que le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures imbrûlés (HC). Les valeurs varient en fonction du régime, de la charge et du type de moteur, pour un carburant équivalent. En moyenne, une réduction de 40 % des émissions de CO et de 30 % des émissions de HC est rapportée (Liguang et al., 2003). Cependant, les gains sur les émissions de CO sont fortement liés au rapport air / carburant utilisé pour le mélange. Ainsi proche du rapport stœchiométrique, les émissions spécifiques de CO, c'est-à-dire les émissions par rapport à la puissance développée, sont similaires pour l'essence ou l'éthanol (Dai et al., 2003; El-Emam & Desoky, 1984).

Le bilan sur les NO_x est plus mitigé et dépend du moteur, de même que des conditions de charge (Taylor et al., 1996). Certains auteurs ont noté des diminutions de NO_x à bas régime ou au ralenti lorsque le mélange (carburant et comburant) introduit bénéficie de l'effet refroidisseur dû à la chaleur latente de vaporisation élevée de l'éthanol (Liguang et al., 2003). D'autres relèvent une augmentation des NO_x dans tous les cas en raison de la température de flamme plus élevée (Hsieh, 2002). Cependant, le taux de recyclage des gaz d'échappement (EGR) acceptable pour un moteur alimenté à l'éthanol peut être plus important sans entraîner de perturbation dans la qualité de la combustion (Gardiner et al., 1999). Les émissions de NO_x seront donc traitées par l'augmentation du taux d'EGR. La chaleur latente de vaporisation de l'éthanol s'avère trois fois supérieure à celle de l'essence (Bronson-Consulting-Group, 2004; Guibet, 1981). Par conséquent, la vaporisation du carburant dans la chambre de combustion induit une diminution de température plus importante que pour de l'essence pure. Le remplissage ou l'efficacité volumétrique (volume d'air admis / volume d'air théorique) est donc accru. Le couple et la puissance s'en trouvent améliorés (Liguang et al., 2003).

1.2.3 Bilan énergétique de l'éthanol

Concernant le bilan énergétique de la production de l'éthanol, il n'y a pas de consensus établi. Cependant, le plus récent rapport émanant du département d'agriculture des États-Unis (Shapouri, Duffield, & Wang, 2002) présente un ratio entre l'énergie nécessaire à la production de l'éthanol - incluant la culture, le ramassage, le transport et la distillation- et l'énergie disponible dans le produit fini de 1 /1.34. Un litre d'éthanol fournit 34 % plus d'énergie que ce qu'il en coûte pour le produire. Certaines études, comme celle de Pimentel (Pimentel, 2003), ont montré que l'éthanol présentait de nombreux points négatifs. Par exemple, dans le cas de l'éthanol dérivé du maïs, il s'agit d'une agriculture dévastatrice pour l'environnement. Enfin, Selon le mode de production, l'empreinte écologique de l'éthanol s'échelonne entre la moitié ou le trois-quarts de celle des principaux carburants fossiles comme le diesel ou l'essence (Krotscheck, König, & Obernberger, 2000). Malgré les points négatifs, une majorité de recherches concluent que l'utilisation de l'éthanol est globalement moins dommageable pour l'environnement, en tenant compte de toutes les étapes s'échelonnant de la culture des céréales jusqu'à la combustion dans un moteur thermique (Krotscheck et al., 2000; Lave, MacLean, Hendrickson, & Lankey, 2000; H.L MacLean & L.B. Lave, 2003; Sinor & Bailey, 1993)

1.3 Conclusion, objectifs et contributions attendues

Cette revue de littérature consacrée aux véhicules hybrides et plus particulièrement à la Toyota Prius a permis de clarifier les modes de fonctionnement ainsi que les caractéristiques générales de la Prius. La majorité des essais réalisés évaluent les performances globales du véhicule en terme d'efficacité énergétique.

La stratégie hybride a été décortiquée par le NREL pour en comprendre le fonctionnement et la reproduire dans le logiciel de simulation ADVISOR. Certains auteurs s'attachent à proposer de nouvelles stratégies, mais à notre connaissance peu d'améliorations des paramètres de la stratégie actuelle ont été réalisées.

L'utilisation de biocarburants entraîne une réduction des émissions de CO_2 , de CO et de HC. Les réductions de NO_x dépendent du moteur et des conditions de fonctionnement. Dans tous les cas, les biocarburants permettent de lutter contre l'augmentation des gaz à effet de serre étant donné que le cycle du CO_2 est court et fermé.

Notre étude portera sur l'utilisation du biocarburant E85 dans un véhicule hybride électrique afin d'évaluer les effets sur les émissions polluantes. Nous allons ensuite modifier les paramètres de la stratégie hybride pour réduire la consommation de carburant et les émissions polluantes du véhicule hybride alimenté au E85. La Toyota Prius servira de modèle de base pour les simulations.

CHAPITRE 2

INFORMATIONS TECHNIQUES

Afin de faciliter la compréhension des recherches menées dans les chapitres suivants, nous présenterons des informations techniques sur les véhicules hybrides, les carburants, les logiciels utilisés pour les simulations ainsi que les cycles d'essais sélectionnés.

2.1 Véhicules hybrides

Comme nous l'avons expliqué dans la revue de littérature, un VHE utilise un moteur thermique et un moteur électrique pour assurer sa propulsion. Le but de cet agencement est de réduire les émissions polluantes et la consommation de carburant. Les quelques véhicules hybrides actuellement disponibles sur le marché nord-américain sont proposés par les constructeurs japonais Honda et Toyota. D'autres constructeurs, notamment américains, semblent intéressés par cette niche de marché.

2.1.1 Hybrides série et parallèle

Dans une configuration hybride série, le moteur électrique agit en série avec le moteur thermique. La transmission de puissance est réalisée de la façon suivante : le moteur thermique entraîne une génératrice qui, à son tour, produit un courant électrique utilisé pour alimenter un moteur électrique connecté avec les roues.

Dans une configuration hybride parallèle, le moteur thermique et le moteur électrique peuvent fonctionner simultanément ou indépendamment. Lorsque la demande de puissance est faible, le moteur thermique entraîne le moteur électrique qui fonctionne

alors comme générateur rechargeant les batteries. Lorsque la demande de puissance est plus forte, le moteur thermique entraîne la transmission et se retrouve secondé par le moteur électrique alimenté par les batteries. Le tableau III présente les avantages et inconvénients des systèmes série et parallèle.

Tableau III

Comparaison des systèmes hybrides série et parallèle

| | Avantages | Inconvénients |
|-----------|--|--|
| Série | Simplicité. Le moteur thermique fonctionne au point de rendement maximum. Le régime moteur est indépendant de la vitesse de rotation des roues. | Le poids du système est élevé. Le moteur électrique doit fournir toute la puissance mécanique aux roues. |
| Parallèle | La puissance maximale est fournie par les deux moteurs, les machines électriques et thermiques sont de petite taille. Une seule machine électrique est nécessaire. Elle fonctionne alternativement en générateur ou en moteur. | La vitesse de rotation du moteur thermique varie avec la vitesse de rotation des roues, ce qui empêche le moteur de fonctionner à son point de rendement maximum. Besoin d'une transmission mécanique plus complexe. |

2.1.2 Stratégies d'hybridation des véhicules hybrides électriques

La stratégie d'hybridation gère la consommation d'énergie provenant des différentes sources embarquées à bord du véhicule. Les paramètres de la stratégie d'hybridation déterminent, par exemple, le niveau de charge des batteries ou encore le seuil de mise en route du moteur thermique à partir duquel les batteries sont rechargées.

2.1.2.1 Influence des batteries dans la définition des stratégies

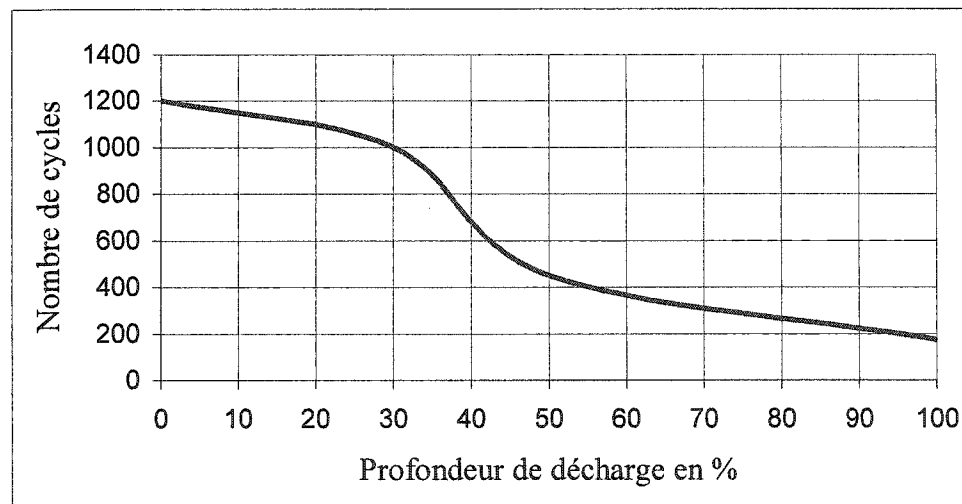
La stratégie d'hybridation est bien souvent issue d'un compromis entre la durée de vie des batteries et l'utilisation maximale de l'énergie qu'elles contiennent. La durée de vie des batteries, ou le nombre de cycle maximal, est influencée par leur profondeur de décharge. Ainsi, le concepteur des stratégies d'hybridation d'un VHE pourra choisir de diminuer les émissions polluantes du moteur thermique en l'utilisant le moins possible et en déchargeant les batteries de façon profonde pour alimenter le moteur électrique. Autrement, le concepteur adoptera une stratégie visant à limiter la décharge des batteries à un faible pourcentage de leur capacité. Dans ce cas, le moteur thermique sera plus sollicité et les émissions polluantes augmenteront.

La première configuration réduira de façon significative la durée de vie des batteries. Le nombre de cycles maximum diminue à 500 pour des décharges à 50 %, alors qu'il était de 1200 pour des décharges à 10 % de la capacité des batteries.

Dans la deuxième configuration, les batteries sont moins sollicitées et elles dureront plus longtemps. Il ne faut pas perdre de vue que le coût des batteries est élevé et que leur fabrication et recyclage sont polluants. La difficulté réside dans la recherche du compromis idéal entre l'utilisation des batteries et du moteur thermique avec comme contrainte le coût et comme objectif une empreinte écologique totale la plus faible.

possible. Après une synthèse des tendances dégagées dans plusieurs ouvrages concernant l'influence de la profondeur de décharge sur le nombre de cycle, (Buchmann, 2001; Panasonic_corp., 1999; Rand & Woods, 1998) nous pouvons dégager la courbe de comportement des batteries décrite dans le graphique 1.

Nous constatons qu'une succession de décharge de plus de 30 % diminue le nombre de cycles tolérés par la batterie. Une durée de vie comprise entre 1000 et 1200 cycles sera rencontrée pour une profondeur de décharge comprise entre 0 et 30 %. La durée de vie sera comprise entre 700 et 1000 cycles pour une profondeur de décharge comprise entre 30 et 40 %. Lorsque la profondeur de décharge atteint 50 %, la durée de vie devient inférieure à 500 cycles.



Graphique 1

Cycles et profondeur de décharge des batteries
Tiré et adapté de (Buchmann, 2001;
Panasonic_corp., 1999; Rand & Woods, 1998)

Une décharge de 50 % réduit donc la durée de vie des batteries d'environ 60 % puisque la batterie tolère 500 cycles au lieu de 1200. Une décharge de 40 % diminue la durée de vie de 40 % alors qu'une décharge de 30 % réduit la durée de vie de moins de 20 %.

Nous retrouvons dans l'article de Bitsche (Bitsche & Gutmann, 2004) plusieurs stratégies d'hybridation couramment implantées dans les VHE. Dans la section qui suit, nous décrivons les principales.

2.1.2.2 Présentation des principales stratégies d'hybridation

a) Marche / arrêt

Dans cette première configuration, la partie électrique, composée des batteries et d'un petit moteur électrique, fournit la puissance pour le lancement du moteur thermique du véhicule. À chaque immobilisation du véhicule, le moteur thermique est arrêté.

b) Hybridation légère

La Honda Insight représente un exemple de ce type de configuration. La partie électrique fournit simplement un surplus de puissance au moteur thermique lors des phases d'accélération. Le moteur thermique est arrêté lors de l'immobilisation du véhicule, mais le véhicule n'est jamais propulsé en mode électrique pur. L'énergie du freinage peut être récupérée par freinage régénératif. La Honda Insight est un hybride parallèle. Le moteur électrique est intercalé entre le moteur thermique et la transmission.

c) Hybridation intégrale

Dans cette stratégie, les moteurs électriques et thermiques sont utilisés séparément ou simultanément afin de maximiser le rendement du système de propulsion. Les zones de faible efficacité du moteur thermique sont évitées. Le véhicule présente des modes de fonctionnement 100 % électrique et le freinage est régénératif. La Toyota Prius présentée en détail au cours du chapitre 1 est un hybride intégral.

2.2 Caractéristiques du moteur thermique sélectionné

Un moteur Honda 1.5 litre est utilisé comme modèle pour la simulation. Sa cylindrée relativement faible, proche de celle du moteur de la Prius, rend ce moteur adéquat pour une utilisation dans un véhicule hybride léger à faible consommation de carburant. Ce moteur Honda, facilement disponible sur le marché canadien, a été démonté et mesuré afin de fournir toutes les informations nécessaires à la simulation (course du piston, alésage, levée de soupape, épaisseur du joint de culasse, surface de la chambre de combustion, rapport volumétrique, etc.). Le tableau IV présente les caractéristiques du moteur retenu. La figure 3 présente une coupe d'un moteur thermique 4 cylindres à 4 temps similaire à celui sélectionné.

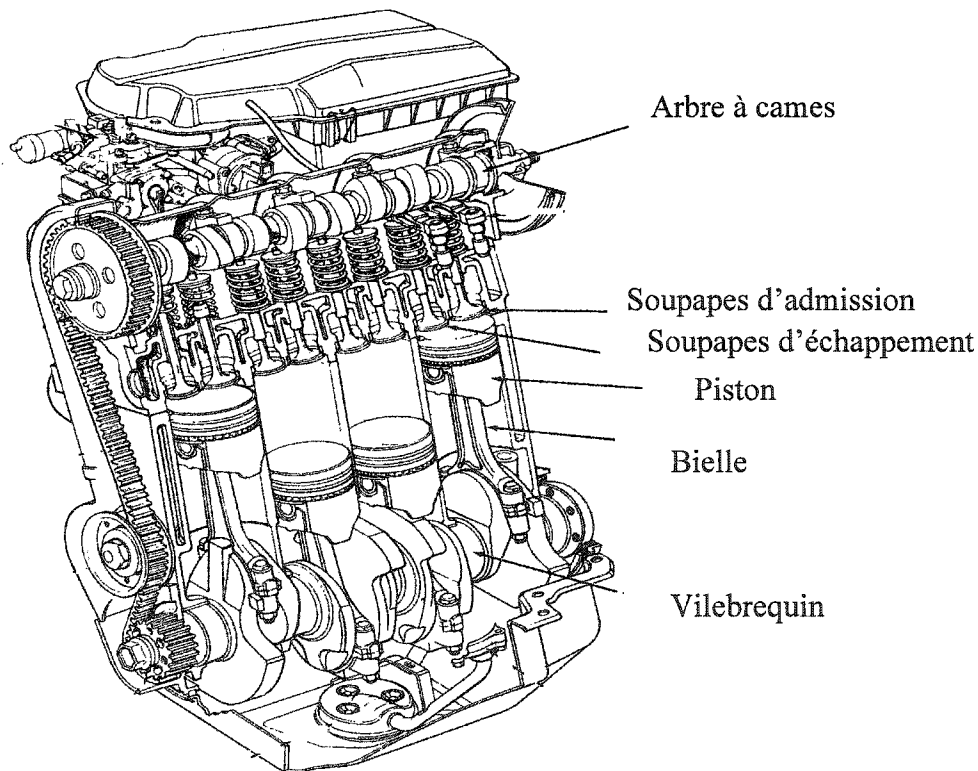


Figure 3 Coupe d'un moteur 4 cylindres à 4 temps
Source: (Heywood, 1988)

Tableau IV
Caractéristiques du moteur simulé

| Paramètres | Description |
|-------------------------------|---|
| Type | 4 cylindres, 4 temps, allumage commandé |
| Alésage X course | 74.58 X 42.8 (mm) |
| Cylindrée | 1.5 litre |
| Puissance au banc | 110 HP (82 kW) à 6500 tr/min |
| Couple au banc | 135 Nm à 3000 tr/min |
| Rapport volumétrique initial | 9.2 |
| Rapport volumétrique pour E85 | 11.5 |

2.3 Présentation des carburants

Les propriétés de l'octane et de l'éthanol sont présentées dans le tableau V. Ces deux carburants mélangés dans des proportions de 85 % d'éthanol et 15 % d'octane constituent le E85.

Le logiciel de simulation Wave, que nous présenterons dans la section suivante, possède par défaut la définition de l'éthanol et de l'octane dans sa base de données de carburants. L'octane, carburant similaire à l'essence, mais dont la composition est connue de façon précise, est utilisé lors des tests en laboratoire. Dans notre simulation, le E85 est composé de 85 % d'éthanol et de 15 % d'octane.

Tableau V
Propriétés des carburants

| Données | Éthanol | Octane | E85 |
|--|----------------------------------|--------------------------------|-------|
| Formule chimique | C ₂ H ₅ OH | C ₈ H ₁₈ | - |
| Densité à 15 degrés Celsius (kg/m ³) | 794 | 720 | 780 |
| Pouvoir calorifique (KJ/Kg) | 26805 | 44720 | 29074 |
| Chaleur latente de vaporisation (kJ/kg) | 854 | 290 | 769 |
| Indice d'octane (RON) | 107 | 100 | 106 |
| Indice d'octane (MON) | 87 | 100 | 89 |
| Tension de vapeur de Reid (kPa) à 37.8 degrés C | 16 | 50 | 41 |
| Rapport stœchiométrique | 9 | 15.1 | 10.88 |
| Teneur massique en oxygène (%) | 32 | 0 | 27.2 |

2.4 Présentation du logiciel de simulation Ricardo Wave

Ricardo Wave est un code d'ingénierie assisté par ordinateur permettant d'analyser les débits de fluides et des déperditions d'énergie dans les conduits, les espaces, et les tubulures de divers systèmes et machines. Wave fournit un traitement unidimensionnel des fluides en fonction du temps. Le traitement du problème par Wave concerne les fluides de fonctionnement comprenant l'air, les mélanges d'air et d'hydrocarbure ainsi que les produits de combustion. Wave est tout à fait adapté à l'analyse des moteurs thermiques. Il résout les équations suivantes :

a) Équation de conservation de masse :

pour un volume de contrôle donné la masse présente est la somme des masses entrantes et sortantes.

$$Masse = \frac{dm}{dt} = \Sigma \dot{m} \quad (2.1)$$

b) Équation de conservation d'énergie :

$$\dot{Energie} = \frac{dme}{dt} = \Sigma \dot{m} . h + sources \quad (2.2)$$

Où (e) est l'énergie totale du fluide, c'est-à-dire son énergie interne et son énergie cinétique, (m) est la masse, (h) est l'enthalpie et le terme *sources* représente tout apport ou perte d'énergie comme un transfert de chaleur ou encore l'énergie dégagée par la combustion.

c) Équation de conservation du moment :

$$Moment = \frac{dm u}{dt} = -A \frac{dp}{dx} dx + \Sigma \dot{m} . u - pertes \quad (2.3)$$

Où (u) représente la vitesse du fluide, (A) la surface perpendiculaire à l'écoulement, (m) représente la masse, (p) la pression. Les *pertes* représentent ici les pertes de charge dans les conduits et lors des changements de section.

Chaque conduit du moteur est fractionné ou discrétisé en zones d'analyses. Dans chaque zone, les équations précédentes seront résolues numériquement par application de la méthode des différences finies.

De nombreuses corrélations sont utilisées par Wave, notamment pour la modélisation de la friction piston/cylindre ou encore pour les transferts thermiques.

La loi empirique de dégagement d'énergie de Wiebe est utilisée pour décrire la combustion. Cette loi est décrite en représentant la fraction massique de mélange (carburant + air) brûlée, $x_b(\theta)$, en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin, θ .

$$x_b(\theta) = 1 - \exp \left[- a \left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_d} \right)^n \right] \quad (2.4)$$

$x_b(\theta)$ = fraction massique brûlée

θ = angle de vilebrequin

θ_s = début de la combustion

θ_d = durée de la combustion

n = facteur de forme

a = facteur d'efficacité

Généralement, $n = 3$ et $a = 5$

L'interface Wave présentant le développement de la combustion selon la loi de Wiebe est montrée à la figure 4. Nous définissons ici la durée de combustion ainsi que le calage du CA50 en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin.

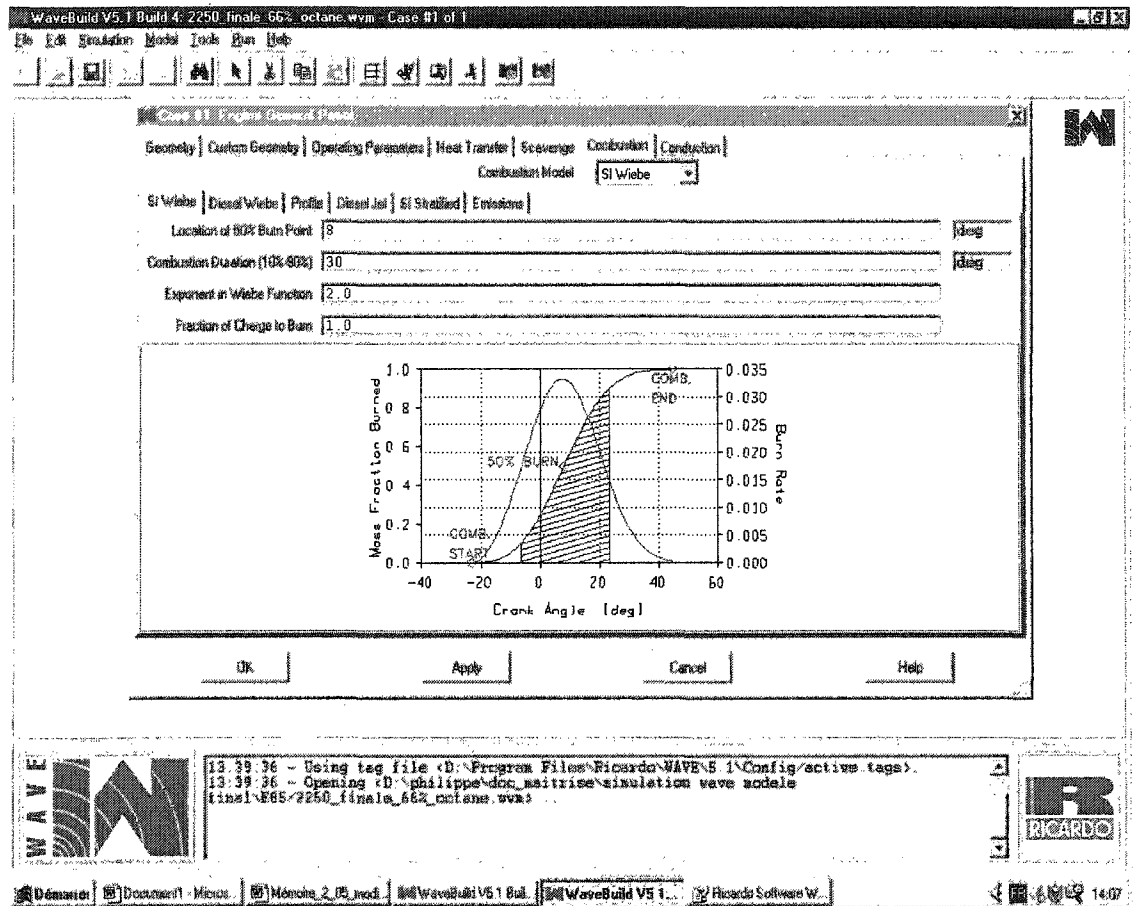


Figure 4 Fenêtre de définition des paramètres de combustion dans Wave

Le CA50 représente le point auquel 50 % de la charge (air + carburant) introduite est brûlée. Le CA50 doit être calé autour de 8 à 15 degrés de rotation du vilebrequin après le point mort haut du piston pour maximiser le travail mécanique du système bielle manivelle. Le logiciel déterminera l'avance à l'allumage pour vérifier les conditions de durée de combustion et de CA50 que nous avons fixées.

De nombreuses études ont été réalisées à l'aide de logiciel Wave (Boretti, Cantore, Mattarelli, & Borghi, 1996; Ciocchi, Noceti, & Bradamante, 1998; Hetherington et al., 1999; Ho, Amlee, & Johns, 1996; Mattarelli, Valentini, & Pivetti, 1998; Millo, Gallone,

& Mallamo, 1999; Osborne, 1999). Menées en grande partie chez des manufacturiers de moteurs, ces études ont permis de vérifier la corrélation des résultats de simulation Wave avec ceux issus des expérimentations.

2.4.1 Définition du modèle simulé à l'aide de Wave

La définition d'un modèle de moteur dans Wave consiste à caractériser les longueurs et les formes des conduits d'admission et d'échappement, l'alésage et la course du piston, le nombre de cylindres, le type d'allumage, le calage de début et la durée de combustion, les épures de distribution, l'épaisseur du joint de culasse, la valeur des volumes morts dans la chambre de combustion, le type de carburant, la position et le type d'injecteur, le dosage de carburant, le régime de rotation, le nombre et le type d'analyse souhaitée, les taux de transfert de chaleur, etc. L'ensemble de ces paramètres permet à Wave de déterminer la puissance, le couple ainsi que les caractéristiques des gaz. Il est utile de comparer la courbe de puissance donnée par Wave avec celle connue pour le moteur pour valider la définition générale du moteur. Cette comparaison sera présentée dans le chapitre consacré à la simulation du moteur.

2.4.2 Prédiction des émissions polluantes à l'aide de Wave

La prédiction des émissions constitue la partie la plus délicate car le phénomène de formation des polluants est complexe à modéliser. Cette difficulté est due aux nombreux facteurs intervenant dans le processus de structuration des polluants. Une première catégorie de facteurs physiques ou géométriques, tels que la dimension des zones où la flamme de combustion ne peut se rendre, joue un rôle important. Nous pourrions citer ici comme exemple la zone délimitée par le segment de feu, la paroi du cylindre et le piston. Cette zone de confinement de la flamme favorise la formation des HC. La figure 5 nous présente la fenêtre Wave de définition des paramètres géométriques influençant

les émissions polluantes. Pour évaluer la formation des polluants, Wave utilise un mode « deux zones » afin de décomposer la chambre de combustion entre la zone des gaz brûlés et la zone des gaz imbrûlés.

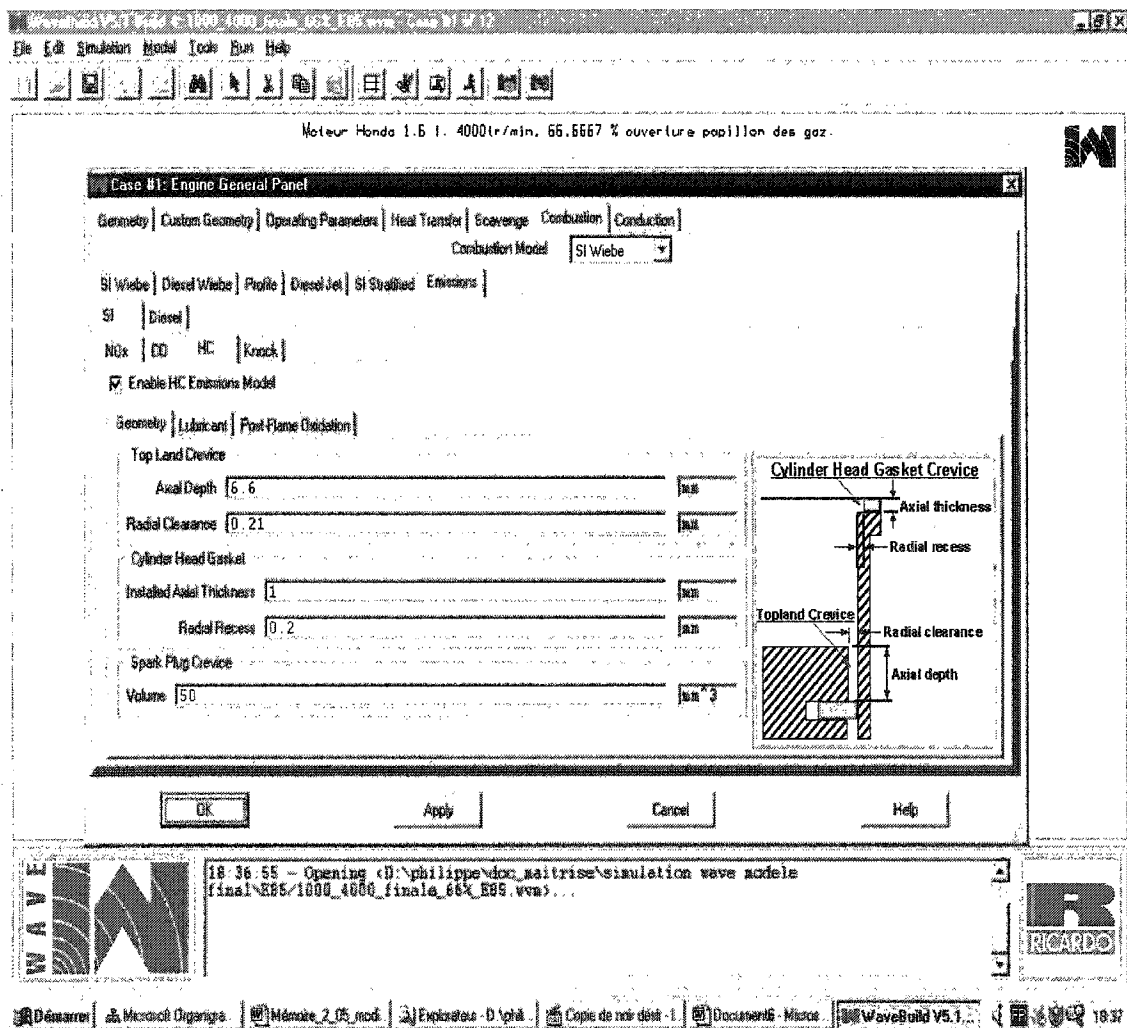


Figure 5 Paramètres géométriques et émissions polluantes

Une seconde catégorie de facteurs liés à la cinétique chimique intervient dans la formation des polluants. Ainsi, il est nécessaire de calibrer l'énergie d'activation des produits de combustion. Ce facteur peut être vu comme un seuil de température au-delà

duquel la réaction chimique se produit. L'ensemble des facteurs que nous venons de présenter doit être défini dans Wave afin de reproduire fidèlement la géométrie de la chambre de combustion, le comportement du front de flamme ainsi que les réactions chimiques en jeu. La figure 6 nous présente la fenêtre Wave permettant de définir les caractéristiques chimiques de la formation des polluants.

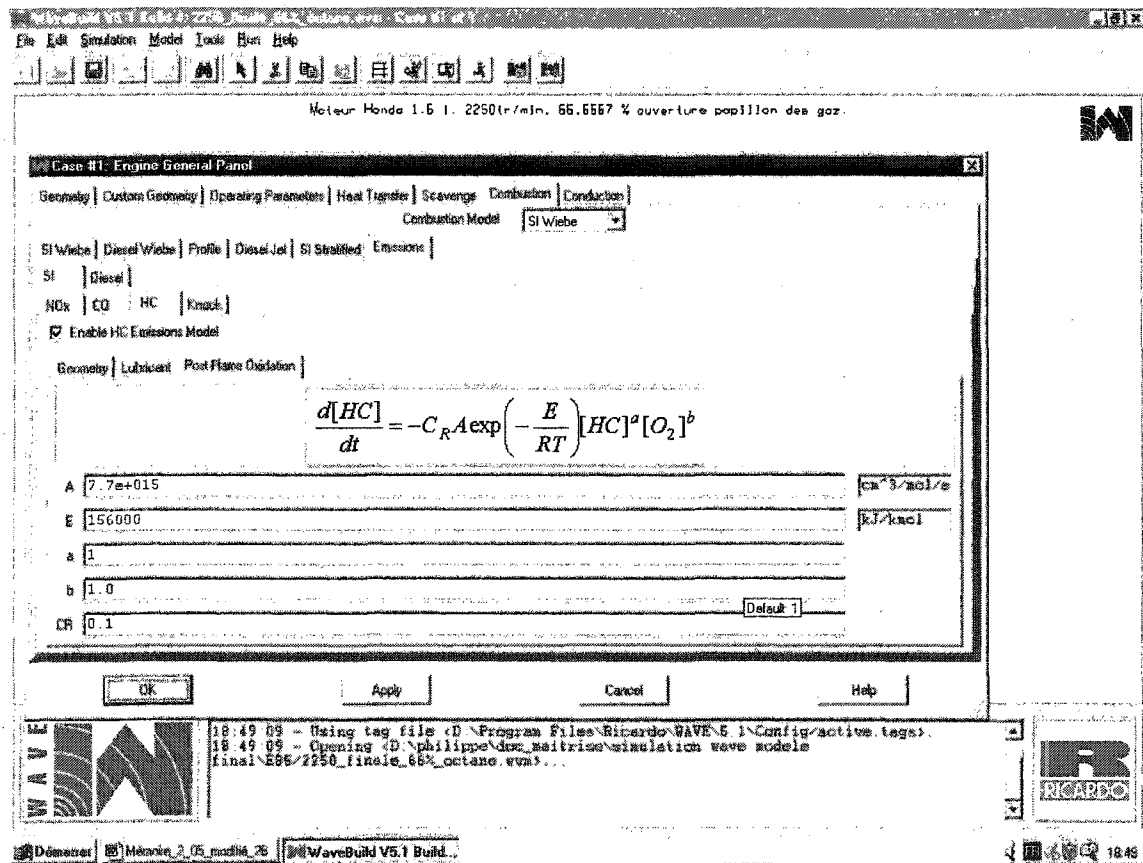


Figure 6 Cinétique chimique de la formation des HC

Une fois le modèle calibré, nous pouvons mener une simulation sur toute la plage de régime et pour diverses ouvertures de papillon des gaz afin de reproduire les états de charge du moteur.

Wave nous permettra de réaliser les tables d'émissions polluantes et de consommation de carburant utiles lors des simulations du VHE complet que nous présenterons au chapitre 4.

2.5 Cycles d'essais routiers normalisés

Les cycles d'essais correspondent à des parcours routiers représentatifs de l'utilisation d'un véhicule. Leurs exigences en terme d'accélération, de vitesse et de durée varient d'un cycle à l'autre. Les deux cycles principaux que nous utiliserons pour évaluer les performances du véhicule sont présentés dans des sections suivantes.

2.5.1 Cycle FTP75

Le cycle FTP75 (Federal Test Procedure) sert de référence pour l'homologation d'un véhicule. Il se divise en 3 parties : le démarrage à froid, la phase transitoire et le démarrage à chaud. Les caractéristiques de vitesse et de distance sont les suivantes : distance parcourue 17.77 km, durée 1874 s, vitesse moyenne 34.1 km/h. Le cycle est présenté à la figure 7. Ce cycle est réalisé sur un banc d'essais à rouleaux et les gaz sortant de l'échappement sont récupérés dans des sacs pour chaque partie du cycle. Ces gaz sont ensuite analysés. Les résultats des émissions polluantes sont exprimés en g/km ou g/mile.

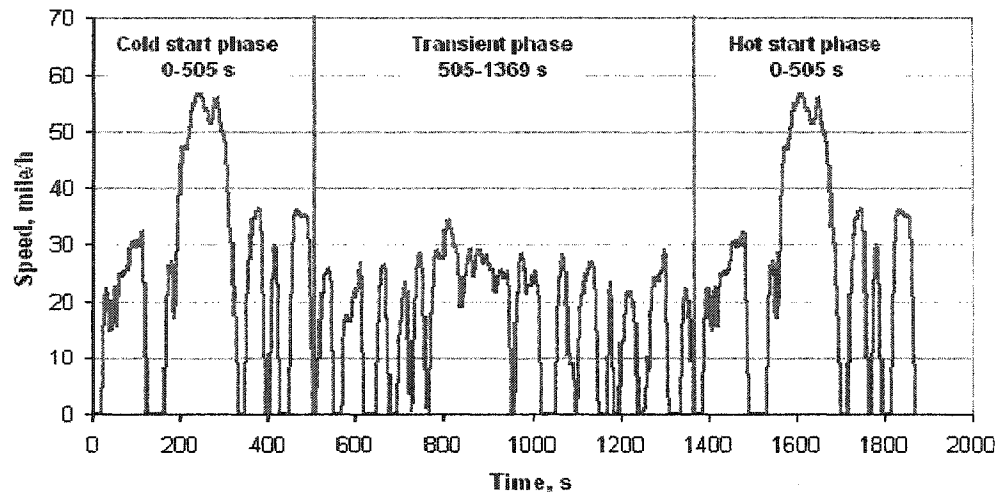


Figure 7 Cycle FTP-75
Source : (Diesel-net)

2.5.2 Cycle US06

Ce cycle correspond à une conduite en conditions agressives. Les caractéristiques sont les suivantes : distance 12.8 km, vitesse moyenne 77.9 km/h, vitesse maximum de 129.2 km/h, durée de 596 secondes. Le cycle est présenté à la figure 8.

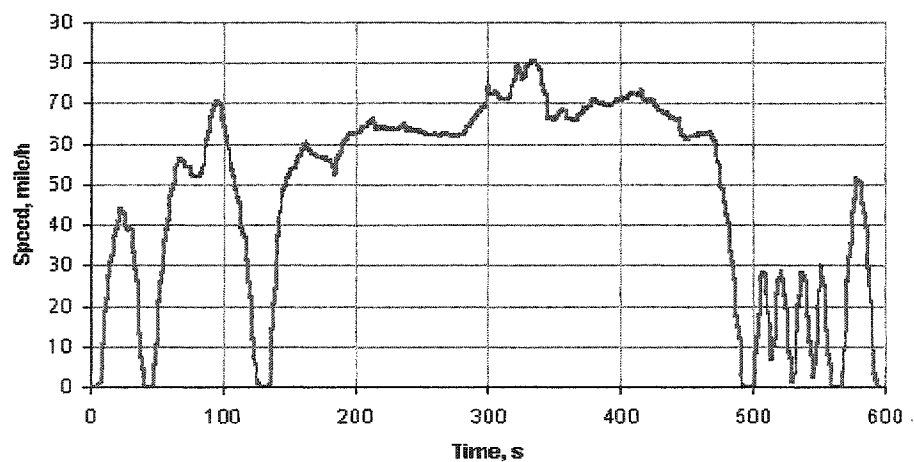


Figure 8 Cycle US06
Source (Diesel-net)

Le cycle US06 représente davantage le style de conduite des automobilistes d'aujourd'hui.

2.6 Présentation du logiciel ADVISOR (Advance Vehicle Simulator)

Développé par le NREL, ADVISOR est un logiciel de simulation de véhicules conventionnels ou hybrides sur des cycles normalisés, tel le cycle FTP ou sur un parcours routier personnalisé (Markel et al., 2002). ADVISOR a été distribué gratuitement via le site Internet du NREL, entre 1998 et 2003. ADVISOR utilise l'environnement MATLAB et le contrôle de Simulink pour les simulations. La figure 9 nous présente les blocs Simulink permettant la modélisation du véhicule. ADVISOR prend en compte la vitesse requise pour suivre le cycle d'essai et détermine alors la puissance, la vitesse de rotation et le couple nécessaire que doit fournir le groupe motopropulseur afin de suivre la consigne. Les émissions polluantes, la consommation de carburant, l'état de charge des batteries, l'accélération, la capacité à gravir les pentes et l'analyse de la répartition des consommations énergétiques sont alors calculés.

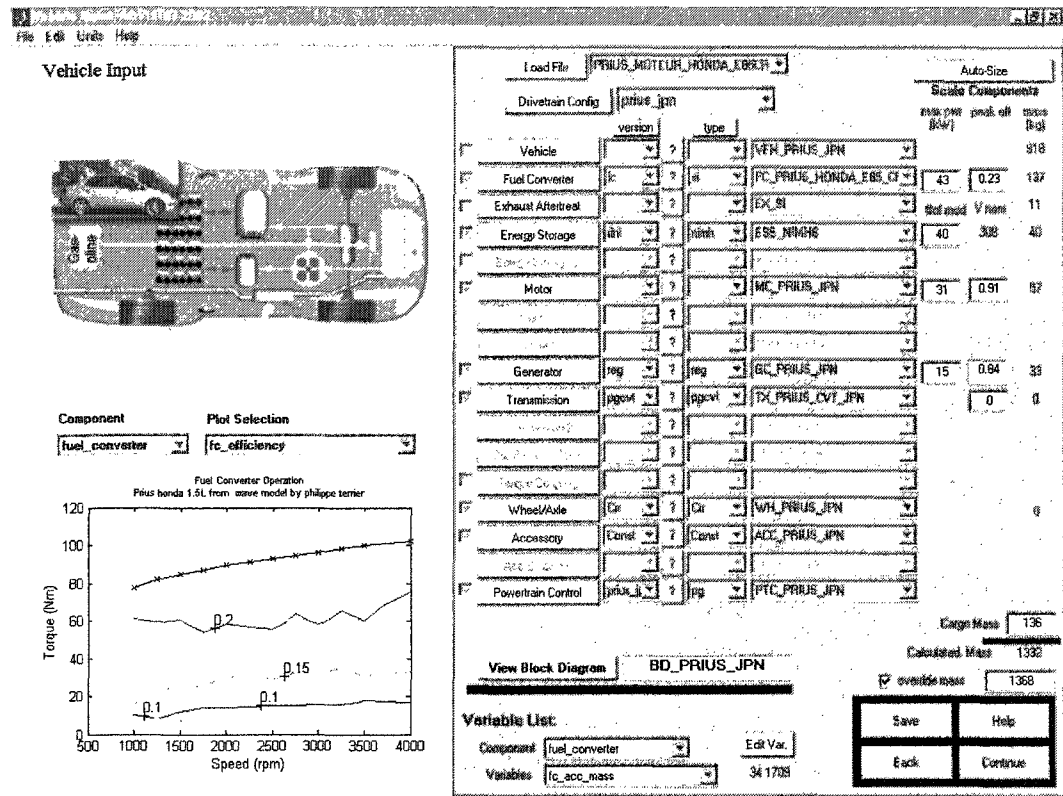


Figure 10 Fenêtre de sélection des caractéristiques du véhicule à simuler

Un exemple de modélisation de véhicule dans ADVISOR est disponible en annexe 1.

2.7 Organisation de la recherche

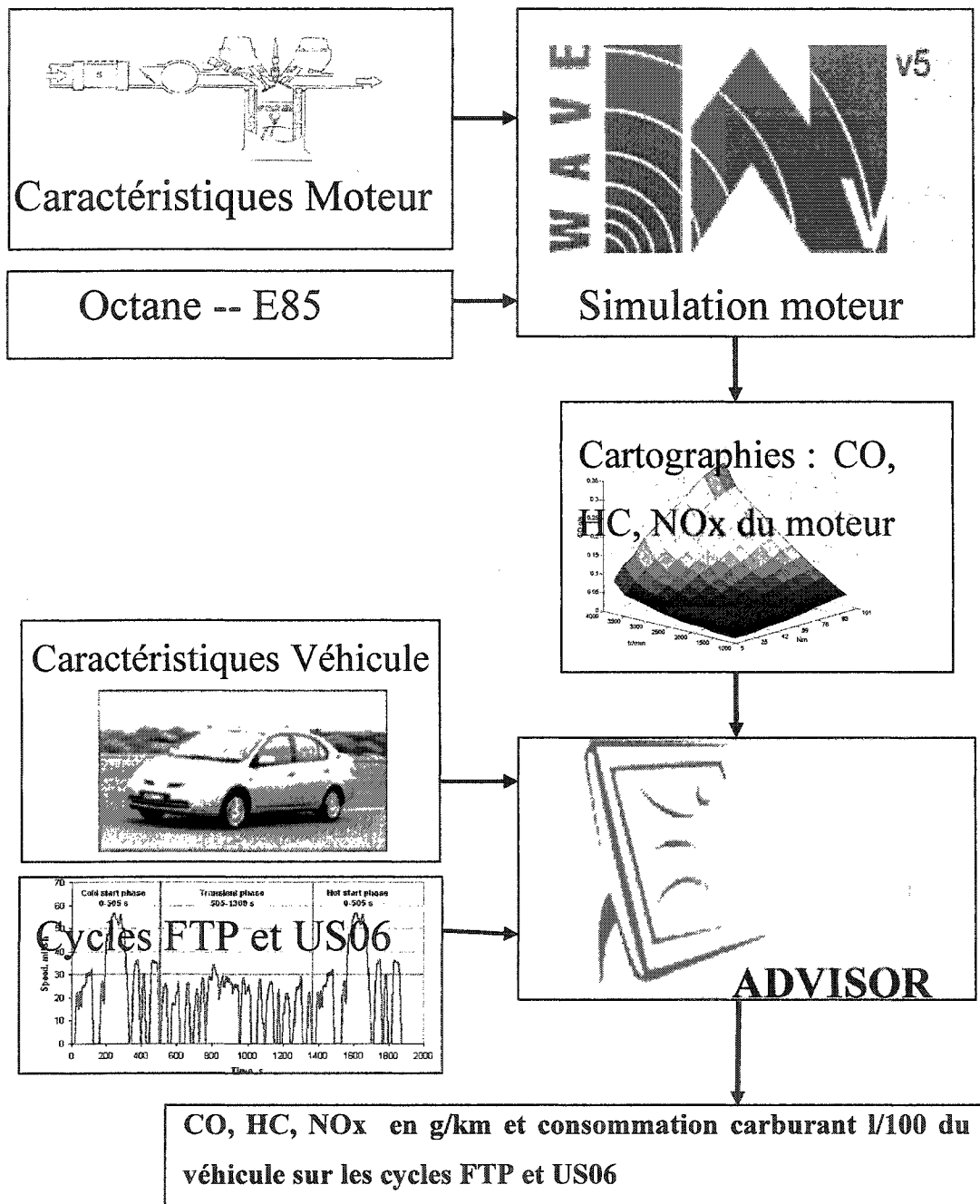


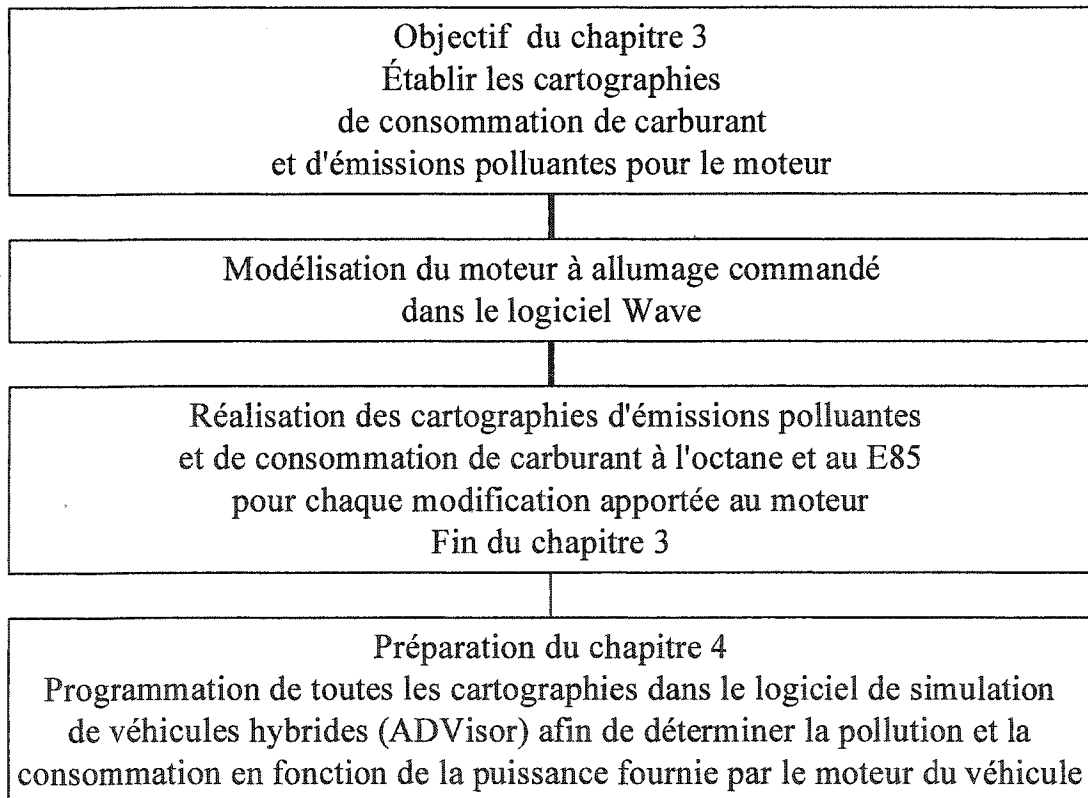
Figure 11 Illustration des modélisations réalisées au cours du projet

La figure 11 présente une illustration des modélisations réalisées dans les logiciels Wave et ADVISOR. Nous pouvons visualiser la succession des étapes du projet ainsi que la contribution des différents logiciels pour chaque simulation.

CHAPITRE 3

SIMULATION D'UN MOTEUR ALIMENTÉ À L'OCTANE ET AU BIOCARBURANT E85

Ce chapitre présente les étapes permettant de cartographier les émissions polluantes ainsi que la consommation de carburant du moteur modélisé qui sera implanté dans le véhicule hybride lors des simulations ultérieures. Ces cartographies ou tables sont indispensables à la modélisation du véhicule car elles permettent, lors d'une simulation complète du véhicule, d'associer le régime et le couple moteur avec les émissions et la consommation de carburant. L'organigramme suivant présente les objectifs et parties principales du chapitre 3.



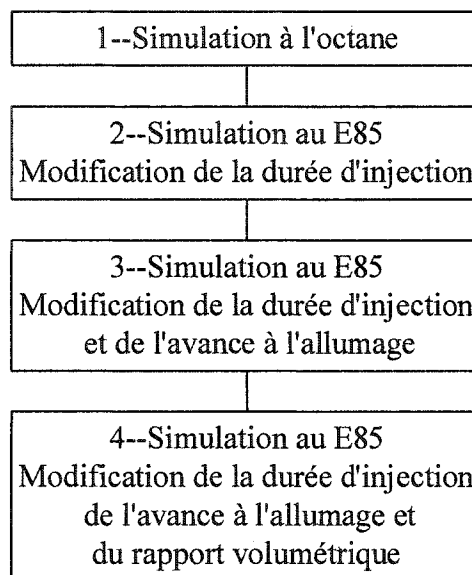
Les tables de consommation et d'émissions polluantes du moteur sont créées par simulation à l'aide du logiciel Wave de la compagnie Ricardo. La vérification du modèle

de prédiction des émissions polluantes par simulation est basée sur des données disponibles dans la littérature. Les émissions spécifiques, exprimées en gr/kWh pour les principaux polluants CO, HC, NO_x, sont présentées dans plusieurs ouvrages traitant de la pollution des moteurs (Benoit, 1996; Bosch_GmbH, 1989) ainsi que dans l'article de Gardiner qui traite à la fois de l'essence et du E85 (Gardiner et al., 1999). L'ensemble des valeurs disponibles dans ces références permet de valider les émissions du modèle Wave.

L'essence est le carburant couramment utilisé pour les moteurs à allumage commandé. Le terme essence est générique mais ne correspond pas à un produit précis en terme de composants chimiques. En effet, d'un raffineur de carburant à un autre et selon les saisons, la composition du produit vendu sous le nom « essence » évolue. Pour la simulation, nous allons utiliser un carburant nommé octane, dont la composition chimique est connue avec précision. Il s'agit en fait d'une essence de qualité supérieure servant de référence pour les expérimentations.

3.1 Présentation des simulations réalisées avec Wave

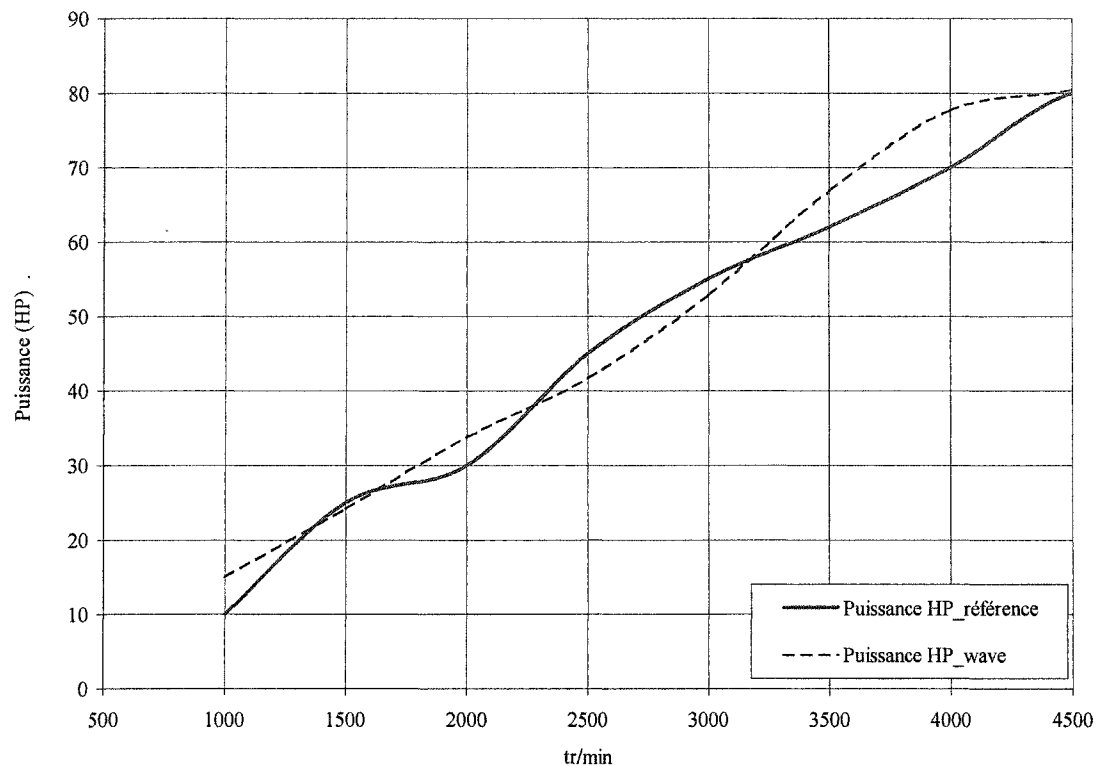
L'organigramme suivant présente les simulations successives qui seront conduites et indique quelles modifications seront apportées au moteur thermique d'une simulation à l'autre.



À l'issue de chaque simulation, les cartographies pour les émissions polluantes et pour la consommation seront établies.

3.2 Vérification du modèle défini avec Wave

Pour s'assurer que le modèle du moteur défini dans Wave correspond de façon fidèle au moteur réel, nous allons comparer la courbe de puissance fournie par Wave à celle d'un essai réalisé au banc et disponible sur le site d'un spécialiste en amélioration de performances (Jackson-Racing). Le graphique 2 présente les résultats.



Graphique 2 Comparaison des courbes de puissance

La comparaison des courbes de puissance est effectuée sur la plage de régime de fonctionnement du moteur de la Toyota Prius, c'est-à-dire entre 1000 et 4500 tr/min. Le modèle Wave donne des résultats assez proches de ceux relevés au banc d'essais. L'écart maximal est évalué à environ 12 % pour le régime de 3800 tr/min.

3.3 Alimentation du moteur thermique à l'octane.

Nous nous attarderons principalement à l'influence du carburant sur les émissions polluantes. Rappelons ici, que les émissions polluantes spécifiques, évaluées en gr/kW.h, représentent la masse de polluants par rapport à la puissance délivrée par le moteur. De nombreux ouvrages présentent les valeurs des émissions spécifiques pour l'essence (Benoit, 1996; Bosch_GmbH, 1989). En ce qui concerne les polluants de base issus de la

combustion des hydrocarbures, soit le CO, les HC et les NO_x, nous considérons qu'ils sont similaires pour l'octane ou l'essence. Le tableau VI présente, pour chaque polluant, les valeurs moyennes des émissions spécifiques pour un dosage stœchiométrique du mélange air/octane introduit dans le moteur.

Tableau VI
Émissions spécifiques pour l'octane

| Polluants | Émissions spécifiques en g/kWh |
|-----------------|--------------------------------|
| HC | 5 |
| CO | 40 |
| NO _x | 15 |

Les valeurs prédites par Wave sur la plage de fonctionnement du moteur thermique correspondent aux valeurs de la littérature présentées dans le tableau VI. Cette observation nous permet de conclure que le modèle du moteur que nous simulons dans Wave représente significativement les émissions polluantes d'un moteur thermique réel.

3.4 Alimentation du moteur thermique au E85

Pour fonctionner avec du E85, le moteur doit subir des modifications physiques (Otte et al., 2000). Les joints et les matériaux utilisés doivent être compatibles avec l'utilisation des alcools. Pour un modèle en simulation, nous changeons simplement la nature du carburant. Afin d'exploiter pleinement le potentiel du E85, le rapport volumétrique peut être augmenté sans crainte de cliquetis - combustion anormale, générant une élévation de température pouvant détruire le moteur - étant donné le fort indice d'octane de l'éthanol. Un rapport volumétrique de 12,2:1 est compatible avec l'utilisation de l'éthanol pur (Clemente, Werninghaus, Coelho, & Ferraz, 2001). Pour l'utilisation du E85, nous

proposons 11.5:1, valeur très proche de celle proposée par Gardiner (Gardiner et al., 1999), qui recommandait 11,19 : 1. De plus, des modifications des cartographies d'injection et d'avance à l'allumage seront indispensables lors du passage de l'octane au E85. En règle générale, le temps d'injection est multiplié par 1.6 lors du passage au E85 afin de compenser la diminution de pouvoir calorifique (Liguang et al., 2003).

Le dosage (masse d'air/masse de carburant) doit être modifié. Le dosage stœchiométrique se situe à 10.88 g d'air pour 1 g de E85, alors qu'il est de 15.1 g d'air pour 1 g d'octane et de 14.7 g d'air pour 1 g d'essence. Les détails du calcul du dosage stœchiométrique ainsi que l'équation de combustion sont disponibles à l'annexe 2.

Contrairement à la cartographie de temps d'injection qui subit une augmentation de 60 % pour tous ces points, la cartographie d'avance à l'allumage est modifiée point par point lors de la conversion d'un moteur à l'éthanol (Halvorsen, 1998; Liguang et al., 2003; Taylor et al., 1996). Il n'y a pas d'augmentation globale de l'avance pouvant satisfaire tous les points de fonctionnement comme dans le cas du temps d'injection. Dans Wave, l'adaptation de la combustion au changement de carburant est relativement simple étant donné que nous ne calibrons pas directement l'avance à l'allumage mais la durée de combustion et le calage du CA50. Ces paramètres ont été définis au cours du chapitre 2. La combustion des mélanges d'alcool, tel que le E85, requiert une augmentation de la durée de combustion pour refléter l'augmentation de l'avance à l'allumage présentée dans plusieurs articles (Halvorsen, 1998; Taylor et al., 1996). Nous avons donc augmenté la durée de combustion de 6 degrés vilebrequin. Nous justifions l'augmentation de l'avance à l'allumage de la manière suivante : étant donnée que la vitesse de combustion est plus élevée pour l'éthanol que pour l'octane, l'augmentation de l'avance à l'allumage pourrait être justifiée par une initiation de la combustion plus lente pour les mélanges d'éthanol que pour l'octane. La vitesse de flamme maximale pour les mélanges air/éthanol se situe à 47 cm/s (Marinov, 1999), alors que pour l'octane, la vitesse se situe autour de 36 cm/s (Ferguson & Kirkpatrick, 2001).

Le tableau VII présente les valeurs d'émissions spécifiques de CO, HC et NO_x pour un mélange stœchiométrique lors de l'utilisation du carburant E85. Les valeurs sont obtenues à partir de l'article de Gardiner (Gardiner et al., 1999) pour les HC et les NO_x, alors que les émissions spécifiques pour le CO sont issues de l'article de Dai (Dai et al., 2003). Les données présentées dans cet article vérifient celles présentées par Gardiner (Gardiner et al., 1999) pour le HC et les NO_x. El-Eman (El-Emam & Desoky, 1984) montrent qu'à la stœchiométrie, les émissions spécifiques de CO sont très proches pour l'octane ou l'éthanol pur.

Tableau VII

Émissions spécifiques pour le E85

| Polluants | Émissions spécifiques en g/kWh |
|-----------------|--------------------------------|
| HC | 3 |
| CO | 38 |
| NO _x | 10 |

La simulation Wave prédit des valeurs moyennes pour les émissions spécifiques qui sont fidèles aux valeurs présentées au tableau VII. Nous considérons que notre modèle Wave est acceptable pour modéliser les émissions polluantes d'un moteur thermique alimenté au E85.

3.5 Élaboration des tables d'émissions polluantes pour l'octane et le E85

Les simulations du modèle sont effectuées pour des ouvertures de papillon des gaz comprises entre 5 % et 100 % par incrément de 5 %. La figure 12 nous montre la position du papillon ainsi que la circulation des gaz dans un moteur. Pour chaque position de papillon des gaz, le régime moteur évolue entre 1000 et 4000 tr/min par pas

de 250 tr/min. Les résultats de simulations sont calculés en régime stationnaire, c'est-à-dire lorsque le moteur a atteint le régime souhaité et non pas durant la phase d'accélération. À la suite de chaque simulation, nous relevons les débits de carburant, de CO, HC et NO_x en g/s en fonction du régime et du couple moteur afin de bâtir les tables d'émissions polluantes et de consommation de carburant.

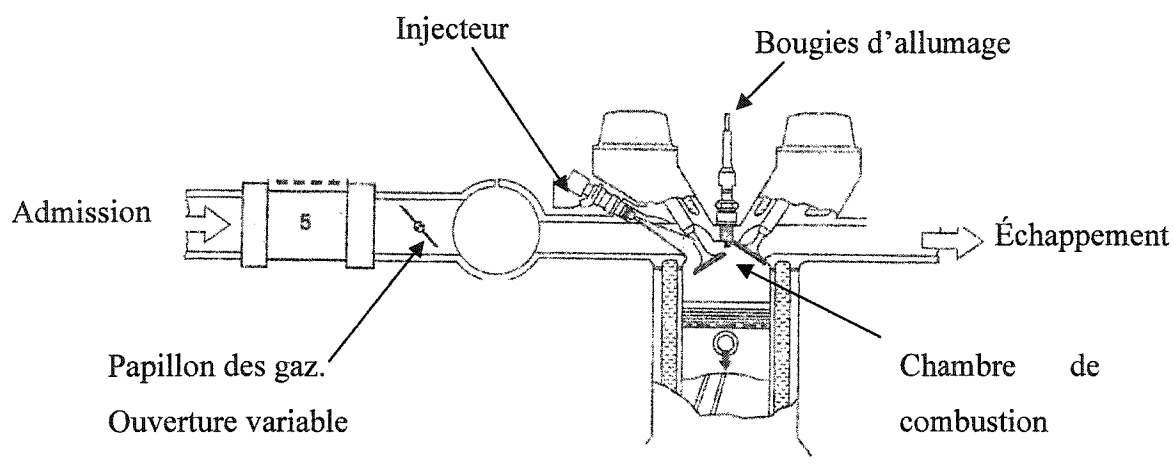


Figure 12 Vue en coupe de la circulation des gaz dans un moteur
Source : (Bosch_GmbH, cahiers techniques)

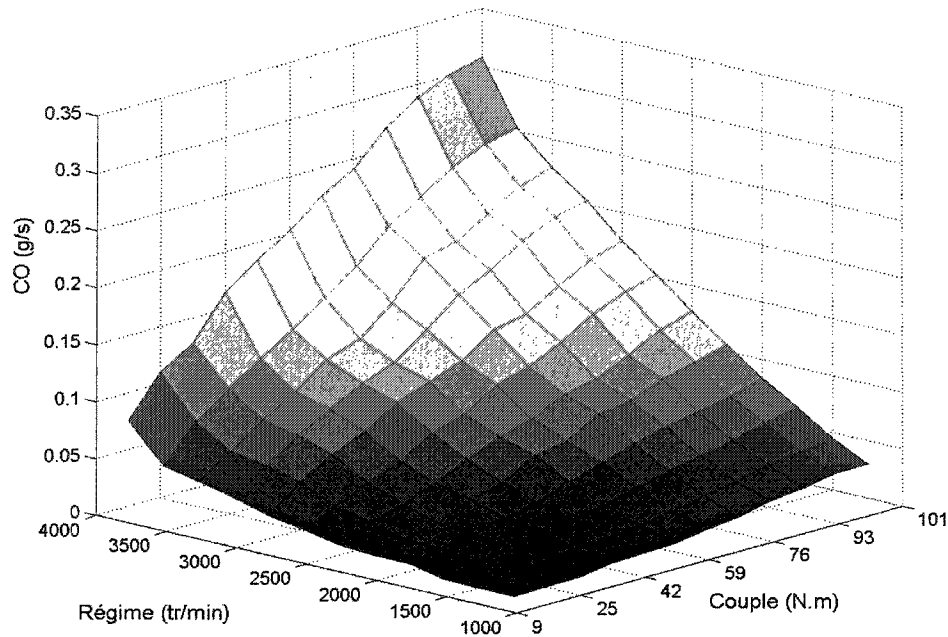
Un exemple de ces tables, comportant le couple (Nm) en abscisse et le régime (tr/min) en ordonnée, est présenté au tableau VIII. Les mêmes simulations sont effectuées pour l'octane et le E85. L'ensemble des cartographies d'émissions et de consommation de carburant pour l'octane et le E85 est disponible en annexe 3.

Tableau VIII

Débit de CO en g/s. Alimentation à l'octane

| Nm tr/min | 9 | 17 | 34 | 42 | 51 | 59 | 67 | 76 | 84 | 93 | 101 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1000 | 0,0001 | 0,0010 | 0,0050 | 0,0060 | 0,0070 | 0,0116 | 0,0147 | 0,0214 | 0,0239 | 0,0291 | 0,0304 |
| 1250 | 0,0001 | 0,0030 | 0,0104 | 0,0130 | 0,0155 | 0,0205 | 0,0263 | 0,0309 | 0,0381 | 0,0408 | 0,0454 |
| 1500 | 0,0005 | 0,0067 | 0,0186 | 0,0206 | 0,0263 | 0,0339 | 0,0408 | 0,0467 | 0,0516 | 0,0595 | 0,0658 |
| 1750 | 0,0071 | 0,0127 | 0,0226 | 0,0297 | 0,0399 | 0,0492 | 0,0577 | 0,0647 | 0,0704 | 0,0760 | 0,0841 |
| 2000 | 0,0071 | 0,0131 | 0,0320 | 0,0395 | 0,0564 | 0,0607 | 0,0766 | 0,0809 | 0,0913 | 0,0980 | 0,1063 |
| 2250 | 0,0093 | 0,0202 | 0,0402 | 0,0535 | 0,0653 | 0,0732 | 0,0874 | 0,0923 | 0,1053 | 0,1190 | 0,1278 |
| 2500 | 0,0155 | 0,0278 | 0,0524 | 0,0691 | 0,0779 | 0,0953 | 0,1037 | 0,1170 | 0,1347 | 0,1459 | 0,1530 |
| 2750 | 0,0208 | 0,0420 | 0,0718 | 0,0893 | 0,0990 | 0,1093 | 0,1293 | 0,1352 | 0,1514 | 0,1661 | 0,1750 |
| 3000 | 0,0291 | 0,0500 | 0,0835 | 0,0983 | 0,1090 | 0,1294 | 0,1524 | 0,1664 | 0,1846 | 0,1965 | 0,2032 |
| 3250 | 0,0362 | 0,0556 | 0,0919 | 0,1119 | 0,1223 | 0,1458 | 0,1771 | 0,1839 | 0,2005 | 0,2160 | 0,2249 |
| 3500 | 0,0434 | 0,0744 | 0,1135 | 0,1308 | 0,1513 | 0,1714 | 0,1980 | 0,2152 | 0,2339 | 0,2461 | 0,2534 |
| 4000 | 0,0760 | 0,1107 | 0,1642 | 0,1843 | 0,2034 | 0,2255 | 0,2412 | 0,2695 | 0,2885 | 0,3009 | 0,3079 |

Le graphique 3 propose une représentation surfacique des émissions de CO en g/s. Nous pouvons apprécier le gradient selon le régime ou la charge du moteur.



Graphique 3 Représentation surfacique des émissions de CO en g/s

3.6 Comparaison des performances des carburants

Au cours de la revue de littérature, nous avons vu que l'utilisation de mélanges à forte teneur en éthanol augmentait le couple. Le graphique 4 nous confirme ce phénomène en comparant les courbes de couple du moteur alimenté à l'octane puis au E85 pour une même ouverture de papillon des gaz de 25 %. Nous pouvons noter une augmentation moyenne du couple de l'ordre de 5 %. La pression moyenne effective, présentée au graphique 5, varie en moyenne de 5 %. Cette variation correspond aux résultats présentés par Dai (Dai et al., 2003).

Rappelons que la pression moyenne effective ou PME est la pression qui, si elle était appliquée de façon constante sur la surface du piston durant toute sa course motrice,

permettrait d'obtenir un travail identique à celui réellement produit par la combustion. Cette grandeur est très utile pour comparer plusieurs moteurs. La PME est définie par la relation suivante :

$$PME = \frac{P \cdot n}{V \cdot N} \quad (3.1)$$

PME = pression moyenne effective en kPa

P = puissance du moteur en W

n = nombre de tours par cycle moteur : n=2 pour un moteur à 4 temps

V = cylindrée du moteur en dm³

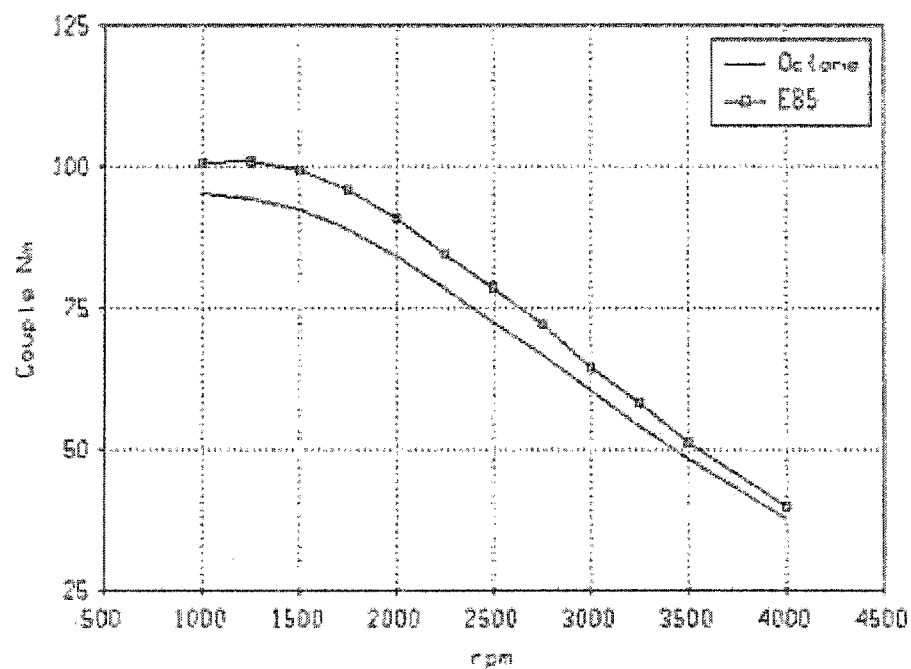
N = régime de rotation du moteur en tr/s

Le terme de puissance peut être remplacé par le produit du couple (Nm) par la vitesse de rotation du moteur (rad/s). En pleine charge, la PME des moteurs à allumage commandé se situe habituellement entre 850 et 1050 kPa soit entre 8.4 et 10.4 bar.

L'utilisation du E85 à la place de l'octane modifie le point de fonctionnement du moteur. Ainsi, le couple délivré sera différent pour un même régime de rotation lorsque le moteur est alimenté avec l'un ou l'autre des deux carburants. Donc, au même régime, pour obtenir le même couple, il faut réduire l'ouverture du papillon des gaz lors de l'utilisation du E85 à la place de l'octane.

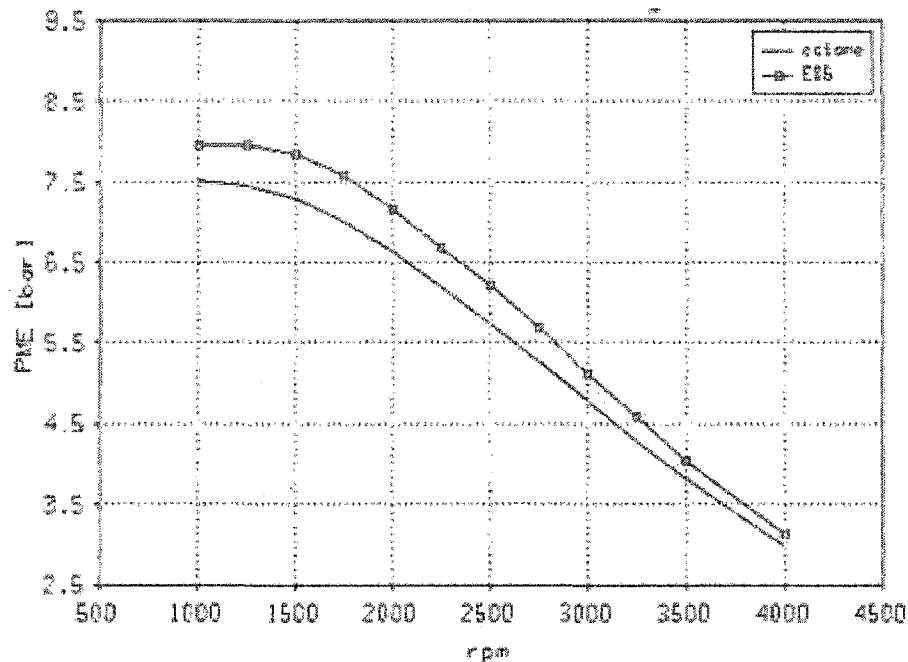
Pour la réalisation des cartographies de consommation et d'émissions de notre véhicule, nous avons utilisé les mêmes points de fonctionnement en couple et en régime que ceux déjà établis pour la Toyota Prius dans le logiciel de simulation ADVISOR. Lorsque le moteur est alimenté au E85, nous devons donc réduire l'ouverture du papillon des gaz pour respecter les points de régime et de couple imposés par la table.

Il est important de spécifier le fait suivant. Lors de l'implantation du moteur alimenté au E85 dans le véhicule hybride, il ne sera pas nécessaire d'optimiser les rapports de transmission afin de réduire le régime de rotation, la consommation de carburant et les émissions du moteur. En effet, le gain de couple causé par l'utilisation du E85 a déjà été exploité en réduisant l'ouverture du papillon lors de la réalisation des simulations ayant servi à composer les tables d'émissions et de consommation de carburant.



Graphique 4

Couple en fonction du régime pour octane et E85



Graphique 5 PME en fonction du régime pour octane et E85

3.7 Bilan du chapitre 3

Au cours de ce chapitre nous avons établi par simulation les différentes cartographies d'émissions et de consommation de carburant pour un moteur de 1.5 litre de cylindrée alimenté à l'octane, puis au E85.

Le E85 utilisé est issu d'un mélange de 85 % d'éthanol et de 15 % d'octane. Commercialement, le E85 est réalisé à partir d'un mélange d'essence et d'éthanol. Le rapport stoechiométrique du E85 est de 10.88, contre 9 pour l'éthanol pur et 15.1 pour l'octane pur.

La conversion d'un moteur au carburant E85 impose des modifications physiques comme par exemple le remplacement de l'ensemble de pièces non compatibles avec les alcools. En plus du dosage (rapport air / carburant) qui doit être adapté, lors de

l'utilisation du E85, l'avance à l'allumage augmente en moyenne de six degrés pour compenser la difficulté d'initiation de la combustion que même une vitesse de flamme plus élevée ne parvient pas contrecarrer.

Enfin, les mélanges contenant de l'éthanol présentent un indice d'octane élevé. Ceci permet d'augmenter le rapport volumétrique de 9 :1 à 11,5 :1 et d'améliorer ainsi le rendement du moteur. Des modifications internes telles que le réusinage de la culasse ou le changement des pistons permettent d'augmenter le rapport volumétrique.

Le logiciel Wave, utilisé pour les simulations, est développé par la compagnie Ricardo. Cet outil est reconnu dans le domaine du développement et de la simulation de moteurs thermiques. Les résultats concernant la prédiction des émissions polluantes ont été validés par comparaisons avec des données issues de la littérature.

Lors de l'alimentation du moteur avec du E85, en remplacement de l'octane, nous avons noté une augmentation moyenne du couple de l'ordre de 5 %.

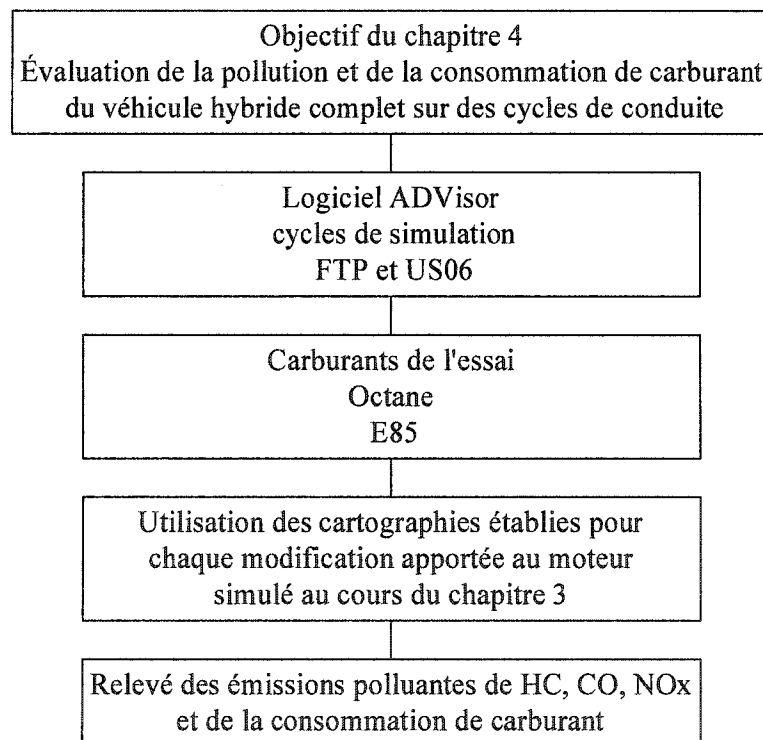
Les cartographies de CO, de HC, de NO_x ainsi que de la consommation de carburant en g/s ont été établies pour l'octane et le E85 pour des régimes variant entre 1000 et 4000 tr/min et pour un couple compris entre 9 et 101 Nm.

Une fois programmées dans le logiciel ADVISOR, les cartographies d'émissions et de consommation de carburant que nous venons de réaliser, permettront à ce logiciel de déterminer les émissions en g/km pour le véhicule hybride électrique complet simulé lors des cycles d'essais FTP et US06.

CHAPITRE 4

SIMULATION D'UN VÉHICULE HYBRIDE ÉLECTRIQUE ALIMENTÉ À L'OCTANE PUIS AU E85 SUR DES CYCLES ROUTIERS NORMALISÉS

Ce chapitre présente les simulations d'un véhicule hybride électrique (VHE) alimenté à l'octane et au E85. Le véhicule est simulé sur plusieurs cycles représentant diverses conditions routières. L'organigramme suivant présente l'objectif et la structure du chapitre 4



La technologie hybride de la Toyota Prius est utilisée comme base du véhicule hybride simulé dans cette étude. Ainsi, nous conservons l'ensemble des caractéristiques de transmission, de masse, d'aérodynamique de la Prius. Seul le moteur, simulé au cours du chapitre 3, différencie le véhicule de simulation d'une Toyota Prius dans son état original. La simulation du véhicule sur les cycles routiers FTP et US06 est réalisée à

l'aide du logiciel ADVISOR. Nous avons présenté ces cycles au cours du chapitre 2. Avant d'implanter le moteur fonctionnant au E85 à bord de notre véhicule de simulation, nous allons modéliser le véhicule avec un moteur alimenté à l'octane.

Nous relèverons les émissions polluantes, CO, HC, NO_x en g/km ainsi que la consommation de carburant en litre/100 km. Ces données constitueront la référence de comparaison lors de l'évaluation du véhicule utilisant le E85.

4.1 Simulation du véhicule sur les cycles FTP et US06

Le véhicule hybride simulé est constitué de tous les éléments d'une Toyota Prius à l'exception du moteur thermique qui est remplacé par celui modélisé à l'aide de Wave (voir chapitre 3) et dont nous avons établi les cartographies d'émissions pour l'octane et le E85. Lors de ces simulations, nous conservons la gestion de la stratégie hybride de la Prius en état d'origine. Le véhicule simulé est alimenté d'abord à l'octane, puis ensuite au E85.

Afin d'obtenir une valeur moyenne plus significative, les essais seront réalisés sur cinq cycles US06 et cinq cycles FTP consécutifs sans remise à zéro des conditions initiales. Nous relèverons les émissions de CO, de HC et de NO_x ainsi que la consommation de carburant lors des cycles. Les tableaux IX et X présentent les résultats. Dans le cas du véhicule alimenté au E85, notons que l'avance à l'allumage et le rapport volumétrique du moteur sont optimisés.

Tableau IX

Émissions et consommation de carburant. Cycle FTP. Octane et E85

| | Octane | E85 | Écart en % |
|-------------------------------|--------|-------|------------|
| Consommation en litre /100 Km | 6,10 | 8,70 | 43 |
| CO en g/km | 0,193 | 0,043 | -77 |
| HC en g/km | 0,170 | 0,126 | -26 |
| NO _x en g/km | 0,262 | 0,122 | -53 |

Tableau X

Émissions et consommation de carburant. Cycle US06. Octane et E85

| | Octane | E85 | Écart en % |
|-------------------------------|--------|-------|------------|
| Consommation en litre /100 Km | 7,90 | 11,00 | 39 |
| CO en g/km | 0,396 | 0,100 | -75 |
| HC en g/km | 0,249 | 0,201 | -19 |
| NO _x en g/km | 0,435 | 0,185 | -57 |

La section suivante présente les gains associés à l'utilisation du E85 par rapport à l'octane.

4.2 Comparaison et analyse des résultats

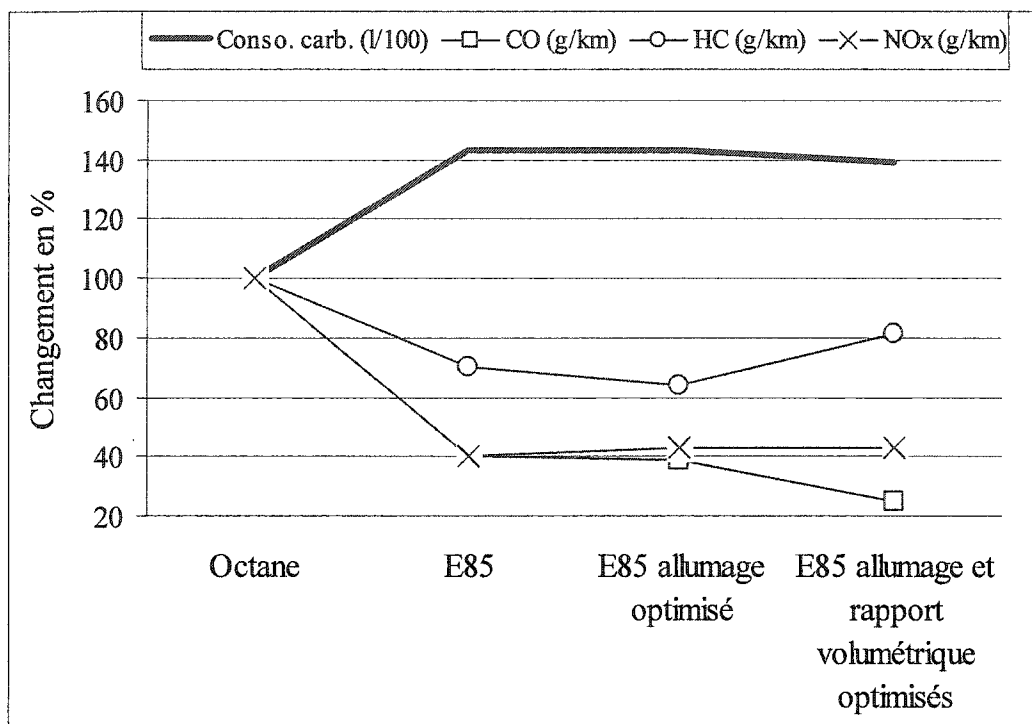
L'utilisation du E85 par rapport à l'octane permet de diminuer les émissions de CO, HC et NO_x. Les tableaux IX et X présentent les écarts relevés. Ainsi, sur les cycles FTP et US06, les émissions de CO diminuent respectivement de 77 et 75 %, les HC de 26 et 19 % et les NO_x de 53 et 57 %. La consommation augmente de 43 et de 39 %. Nous observons que les variations d'émissions associées au passage de l'octane au E85 sont du même ordre de grandeur peu importe le cycle. Les données issues de la littérature et présentées au paragraphe 1.2.2 annonçaient une réduction des CO de 40 % et des HC de 30 %. La réduction des HC correspond donc à celle attendue alors que la réduction des

CO est plus importante. Pour la réduction des NO_x , nous avons précisé qu'il n'y avait pas de consensus établi.

4.2.1 Influence des modifications successives apportées au véhicule

Nous avons évalué les gains apportés par chaque modification successive sur le moteur. À savoir, l'avance à l'allumage, le rapport volumétrique ou la combinaison des deux sur les émissions et la consommation. Dans tous les cas, le dosage est stœchiométrique (rapport air / carburant assurant une combustion complète selon l'équation de combustion). L'ensemble des résultats est disponible en annexe 4. Comme l'illustrent les graphiques 6 et 7, le passage de l'octane au E85 (sans modification de l'avance à l'allumage et du rapport volumétrique) permet de réduire le CO de 60 % sur US06 et de 66 % sur FTP, les HC de 30 % sur US06 et de 41 % sur FTP et les NO_x de 60 % sur US06 et de 59 % sur FTP. La consommation augmente de 43 % sur US06 et de 44 % sur FTP.

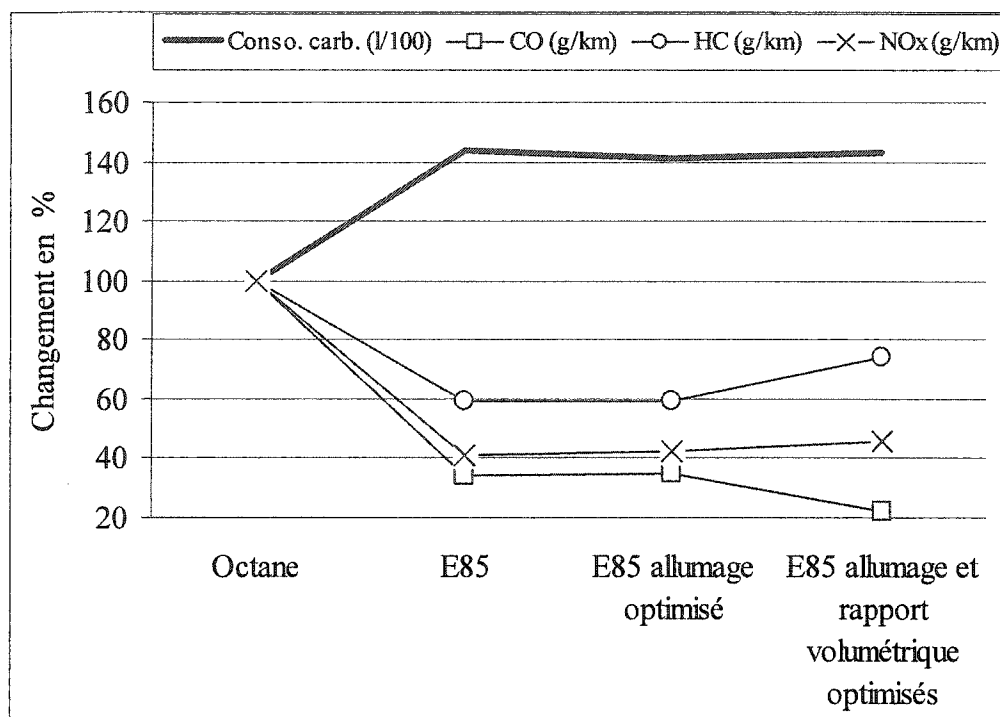
Dans la majorité des études consacrées à l'utilisation du E85, l'avance à l'allumage et le rapport volumétrique du moteur ne sont pas adaptés pour le E85. Dans les mêmes conditions, c'est à dire avant l'optimisation de l'avance à l'allumage et du rapport volumétrique, les résultats présentés par la littérature et nos résultats de simulation se rapprochent. Nous obtenons une réduction des CO de 60 % sur US06 alors que la littérature fait état d'une baisse de 40 %. Les HC sont réduits de 30 % tant dans notre simulation que dans la littérature.



Graphique 6

Influence des paramètres du moteur sur les émissions et la consommation pour Octane et E85. Cycle US06

La comparaison des émissions entre nos simulations et la littérature ne doit pas nous faire perdre de vue certaines différences importantes. Nous réalisons nos essais sur des cycles précis et pour un véhicule hybride complet alors que dans la littérature, ce sont souvent des essais réalisés sur un seul point de fonctionnement pour un moteur au banc d'essai.



Graphique 7 Influence des paramètres du moteur sur les émissions et la consommation pour Octane et E85. Cycle FTP

4.2.2 Rôle de l'avance à l'allumage

En adaptant l'avance à l'allumage, sur US06 et FTP respectivement, un gain de 6 % et de 1 % supplémentaire sur la réduction des HC est réalisable. Le CO reste inchangé sur US06 et diminue de 2 % sur FTP mais les NO_x augmentent de 3 % sur US06 et diminuent de 1 % sur FTP. L'influence de l'avance à l'allumage sur les émissions est donc relativement limitée.

4.2.3 Rôle du rapport volumétrique

Après augmentation du rapport volumétrique à 11.5 :1 au lieu de 9 :1 et adaptation de l'avance à l'allumage, sur US06 et FTP respectivement, le CO est réduit de 15 % et 11 % supplémentaires, les NO_x augmentent de 3 % et 5 % alors que la consommation de carburant diminue de 4 % et 2 % par rapport au moteur où seulement l'octane est remplacé par du E85. Cependant, les HC augmentent de 11 % sur US06 et de 15 % sur FTP. Sodré (Sodré & Yates, 1996) présente une augmentation des HC avec l'augmentation du rapport volumétrique qui vérifie la tendance que nous avons relevée. Sodré explique cette observation par le fait que l'augmentation de la pression dans le cylindre liée à l'accroissement du rapport volumétrique amplifie le rôle des zones d'emprisonnement des HC (jeu entre le haut du piston et la paroi du cylindre). Dans ces zones, le phénomène d'absorption et de rejet des HC est donc amplifié par la plus forte pression dans le cylindre.

4.2.4 Émissions de CO₂

À puissance équivalente, la quantité de CO₂ émise lors de la combustion du E85 par rapport à l'octane est plus élevée. Ceci s'explique en raison de l'augmentation nécessaire de la quantité de E85 injectée, car le pouvoir calorifique du E85 est plus faible que celui de l'octane. Sur le cycle US06, le véhicule alimenté à l'octane rejette 214 g/km alors que celui alimenté au E85 rejette 301 g/km. Cependant, comme nous l'avons déjà expliqué dans la revue de littérature, le CO₂ émis par la combustion de l'éthanol a été absorbé par la plante lors de sa croissance, contrairement au CO₂ émis par l'octane qui, lui, correspond à un nouvel ajout de CO₂ dans l'atmosphère (Kahn Ribeiro & Staib Younes-Ibrahim, 2001; Sagar, 1995).

4.2.5 Véhicule simulé par rapport aux véhicules polycarburants

Aucun article ne présente de résultats concernant les émissions d'un véhicule hybride alimenté au E85. Les seules recherches disponibles présentent les émissions de véhicules FFV (Flexible Fuel véhicule). Ces véhicules sont conçus pour fonctionner avec des mélanges de carburant dont la concentration peut varier entre 0 et 100 % d'éthanol. Les capteurs installés à bord du véhicule détectent la concentration en éthanol. Le calculateur ajuste alors les cartographies d'injection et d'allumage automatiquement. La fiabilité de certains de ces systèmes reste à prouver. Les gains sur les émissions polluantes, mesurés sur les véhicules FFV alimentés au E85, montrent une disparité importante selon les auteurs et les études. Dans le tableau XI, nous exposons quelques résultats de recherche menés sur les FFV, ainsi que nos propres résultats.

Tableau XI

Variation des émissions et de la consommation. Passage de l'octane vers le E85

| | Guibet (Guibet & Faure, 1997) FFV E85 | Hu (Hu, Pu, Fang, & Wang, 2004) FFV E85 | Vehicule Hybride E85 |
|-------------------------------------|--|--|-------------------------|
| Variation l/100 en % | 38 | 34 | 43 |
| Variation CO g/km en % | -42 | -25 | -78 |
| Variation HC g/km en % | -73 | -15 | -26 |
| Variation NO _x g/km en % | -20 | -10 | -53 |

4.3 Bilan du chapitre 4

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté et comparé les différentes catégories de véhicules hybrides électriques. La Toyota Prius, véhicule de référence pour nos simulations, constitue une solution originale, combinant hybridation série et parallèle.

Le véhicule hybride est simulé sur les cycles routiers normalisés US06 et FTP. Le cycle US06, plus intensif que le FTP, représente les conditions actuelles d'utilisation d'un véhicule et nous considérons qu'il est plus représentatif.

Les simulations, réalisées à l'aide du logiciel ADVISOR, permettent de déterminer la consommation et les émissions de CO, HC et NO_x en g/km sur les cycles sélectionnés. Pour prédire les émissions et la consommation de carburant, ADVISOR extrapole des données consignées dans des tables. Ces tables ont été éditées à partir de simulations conduites dans le logiciel Ricardo Wave.

Lors de la conversion du moteur au E85, nous devons adapter le dosage de carburant, l'avance à l'allumage et, pour exploiter tout le potentiel du E85, le rapport volumétrique. Pour évaluer l'influence de chaque étape, nous avons édité des tables de consommation et d'émissions polluantes après chaque transformation. Ainsi, le passage de l'octane au E85 (sans modification de l'avance et du rapport volumétrique) permet de réduire le CO de 60 % sur US06 et de 66% sur FTP, les HC de 30 % sur US06 et de 41 % sur FTP et les NO_x de 60 % sur US06 et de 59 % sur FTP. La consommation augmente de 43 % sur US06 et de 44 % sur FTP.

L'adaptation de l'avance à l'allumage joue un rôle secondaire en induisant des variations de +/- 6 % maximum sur les polluants ou la consommation de carburant. Par rapport au moteur où seulement l'octane est remplacé par du E85, après augmentation du rapport volumétrique à 11.5 :1 au lieu de 9 :1 et optimisation de l'avance à l'allumage sur US06 et FTP respectivement, le CO est réduit de 15 % et 11 % supplémentaires, les NO_x

augmentent de 3 % et 5 % alors que la consommation de carburant diminue de 4 % et 2 %. Cependant, les HC augmentent de 11 % sur US06 et de 15 % sur FTP. Les tendances que nous observons sont similaires à celles présentées dans la littérature.

Le rapport volumétrique influence les émissions de CO à la baisse et les HC à la hausse. Les NO_x sont peu influencés par les changements successifs d'avance et de rapport volumétrique. Pour l'ensemble des polluants, c'est essentiellement le passage de l'octane au E85 qui permet de réduire de façon significative les émissions au détriment de la consommation de carburant.

Enfin, dans le but de situer un véhicule hybride électrique alimenté au E85 par rapport à un FFV (flexible fuel vehicle), nous pouvons avancer les faits suivants: l'augmentation de consommation de carburant est du même ordre de grandeur, autour de 34 à 44 % ; la réduction des CO paraît plus efficace sur un véhicule hybride avec une diminution de 78 % en comparaison de 25 à 42 % sur un FFV ; les variations dans la réduction des HC pour un FFV se situent entre 15 et 73 % selon les sources. Nous pouvons noter que le véhicule hybride électrique apporte une réduction de 26 % des HC. Les NO_x sont réduits de 10 à 20 % sur un FFV lors de l'utilisation du E85 par rapport à l'essence, alors que sur notre véhicule de simulation, nous avons noté une réduction de 53 % des NO_x lors de la conversion au E85.

L'ensemble des résultats relatifs aux véhicules hybrides électriques n'inclut pas la modification de la stratégie hybride. Cette dernière évolution permettra sans doute une réduction plus marquée des émissions polluantes. Nous allons présenter cette étude au cours du chapitre 5.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DES STRATÉGIES D'HYBRIDATION D'UN VÉHICULE HYBRIDE ÉLECTRIQUE ALIMENTÉ À L'OCTANE ET AU E85 SUR LES CYCLES FTP ET US06

Au cours du chapitre 4, nous avons introduit la notion de stratégie d'hybridation d'un véhicule. La stratégie hybride gère la consommation d'énergie entre les différentes sources embarquées à bord du véhicule. De plus, les paramètres de la stratégie sont ajustés pour tenir compte des changements de point de rendement maximum du moteur thermique selon le carburant utilisé. Nous avons déjà présenté l'augmentation des performances du moteur thermique en fonction du carburant lors du chapitre 3.

Dans ce cinquième chapitre, nous évaluerons d'abord l'influence des paramètres de la stratégie hybride sur les émissions et la consommation de carburant, tant sur le cycle US06 que FTP, lors de l'utilisation de l'octane ou du E85. Ensuite, nous proposerons une stratégie hybride optimale, pour chaque carburant. Nous évaluerons les réductions potentielles des émissions polluantes ainsi que les variations de consommation de carburant associées aux modifications de la stratégie hybride.

5.1 Présentation des paramètres assurant la gestion de la stratégie hybride

La modélisation de la stratégie hybride d'un VHE, telle que simulée dans ADVISOR, consiste à contrôler les paramètres décrits dans le tableau XII. Ces paramètres sont ceux utilisés lors de la modélisation de la Toyota Prius dans le logiciel.

Tableau XII

Paramètres généraux de la stratégie hybride

| Paramètres | Variable ADVISOR | Valeur |
|---|-------------------------------|-------------------|
| État de charge, niveau haut des batteries | <i>cs_hi_soc</i> | 75 % |
| État de charge, niveau bas des batteries | <i>cs_lo_soc</i> | 45 % |
| Valeur moyenne état de charge batteries | <i>cs_target_soc</i> | 56 % |
| Vitesse en dessous de laquelle le véhicule fonctionne seulement en propulsion électrique | <i>cs_electric_launch_spd</i> | 36 km/h |
| Vitesse maximale de rotation du moteur thermique | <i>cs_max_fc_spd</i> | 4000 tr/min |
| Vitesse maximale de rotation du moteur électrique | <i>cs_max_gc_spd</i> | 5500 tr/min |
| Puissance en dessous de laquelle le moteur thermique est arrêté | <i>cs_min_pwr</i> | 6000 Watts |
| État de charge des batteries en dessous duquel le moteur thermique doit être mis en route | <i>cs_eng_on_soc</i> | 50 % |
| Vitesse de rotation minimale du moteur thermique en dessous de laquelle il doit être arrêté | <i>cs_eng_min_spd</i> | 1200 tr/min |
| Température en dessous de laquelle le moteur thermique est maintenu en fonctionnement pour le réchauffement des différents systèmes | <i>cs_clt_tmp</i> | 75 degrés Celsius |

Les paramètres contrôlant la stratégie hybride du véhicule sont nombreux. Nous ne modifierons pas tous les paramètres mais simplement ceux influençant de façon importante les émissions polluantes ou la consommation de carburant.

5.2 Influence des paramètres de la stratégie hybride sur les émissions polluantes et la consommation de carburant

Cette section a pour objectif de déterminer quels sont les paramètres de la stratégie hybride les plus influents sur la consommation de carburant et les émissions polluantes. Les simulations nécessaires à cette étude seront réalisées sur les cycles FTP et US06. Après avoir sélectionné les paramètres principaux, nous quantifierons leur l'influence sur les émissions polluantes et la consommation de carburant pour le véhicule alimenté à l'octane puis au E85. Le tableau XIII présente les paramètres de la stratégie hybride qui seront évalués. Les différentes simulations réalisées sont décrites au tableau XIV.

Tableau XIII

Paramètres de la stratégie hybride à évaluer

| Paramètres | Variable ADVISOR | Valeur initiale |
|--|-------------------------------|-----------------|
| État de charge, niveau haut des batteries | <i>cs_hi_soc</i> | 75 % |
| État de charge, niveau bas des batteries | <i>cs_lo_soc</i> | 45 % |
| Valeur moyenne pour l'état de charge batteries | <i>cs_target_soc</i> | 56 % |
| Vitesse en dessous de laquelle le véhicule fonctionne seulement en propulsion électrique | <i>cs_electric_launch_spd</i> | 36 km/h |
| État de charge des batteries en dessous duquel le moteur doit être mis en route | <i>cs_eng_on_soc</i> | 50 % |

Tableau XIV

Présentation des simulations

| | Cycle FTP | Cycle US06 |
|---------------|---|---|
| Simulation #1 | Prius configuration originale | Prius configuration originale |
| Simulation #2 | <i>cs_hi_soc</i> de 50 à 100 % | <i>cs_hi_soc</i> de 50 à 100 % |
| Simulation #3 | <i>cs_lo_soc</i> de 10 à 50 % | <i>cs_lo_soc</i> de 10 à 50 % |
| Simulation #4 | <i>cs_eng_on_soc</i> de 20 à 80 % | <i>cs_eng_on_soc</i> de 20 à 80 % |
| Simulation #5 | <i>cs_target_soc</i> de 20 à 80 % | <i>cs_target_soc</i> de 20 à 80 % |
| Simulation #6 | <i>cs_electric_launch_spd</i> de 10 à 60 km/h | <i>cs_electric_launch_spd</i> de 10 à 60 km/h |

Les simulations ont permis d'effectuer un classement quant à influence de chaque paramètre sur les émissions polluantes et la consommation de carburant pour le véhicule alimenté à l'octane. Le tableau XV présente ce classement.

Tableau XV

Classement des paramètres de la stratégie hybride selon leur influence
sur les émissions polluantes et la consommation de carburant

| Paramètres | Influence sur litre/100 en % | | Influence sur CO en % | | Influence sur HC en % | | Influence sur NO _x en % | | Classement des paramètres | |
|--------------------------|------------------------------------|-----|-----------------------------|-----|-----------------------------|-----|--|-----|---------------------------------|-----|
| | US06 | FTP | US06 | FTP | US06 | FTP | US06 | FTP | US06 | FTP |
| <i>cs_hi_soc</i> | 1 | 11 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 5 | 4 | 4 |
| <i>cs_lo_soc</i> | 4 | 1 | 1 | 10 | 2 | 4 | 1 | 8 | 3 | 3 |
| <i>cs_eng_on_soc</i> | 2 | 7 | 1 | 39 | 1 | 16 | 1 | 28 | 2 | 2 |
| <i>cs_target_soc</i> | 11 | 10 | 15 | 50 | 14 | 28 | 11 | 34 | 1 | 1 |
| <i>cs_electri_launch</i> | 0 | 4 | 0 | 12 | 0 | 5 | 0 | 9 | 5 | 5 |

Les paramètres les plus influents sont *cs_target_soc* et *cs_eng_on_soc*, car lors de leur variation, ces paramètres ont un impact significatif sur la consommation et les émissions polluantes du véhicule. Ainsi, lors de la modification de la stratégie hybride du véhicule alimenté à l'octane puis au E85, nous étudierons seulement ces deux paramètres. Notre contrainte sera dictée par le respect des consignes de vitesse des cycles FTP et US06. Nous tolérerons un écart de 5 % par rapport à la consigne de vitesse lors des très fortes accélérations imposées par le cycle US06. Notre objectif consistera à atteindre un compromis acceptable entre la réduction des polluants et de la consommation de carburant.

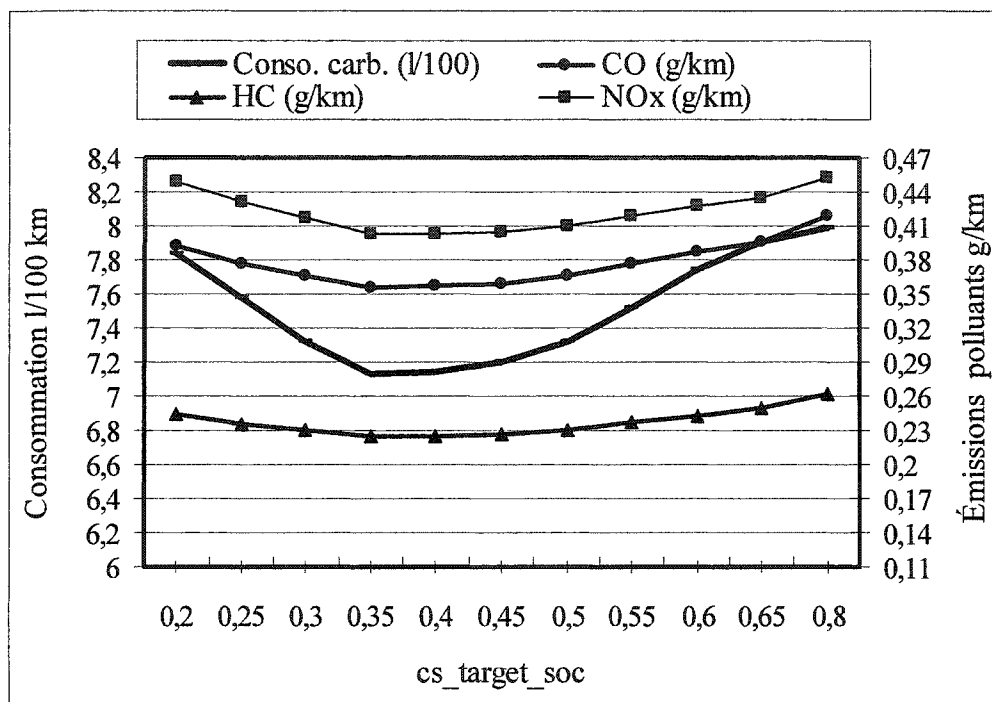
5.2.1 Véhicule alimenté à l'octane

Pour le véhicule alimenté à l'octane, nous allons étudier l'influence des paramètres de la stratégie hybride *cs_target_soc* et *cs_eng_on_soc* considérés comme les principaux en raison de leur action sur la consommation de carburant et les émissions polluantes.

5.2.1.1 Influence des paramètres principaux de la stratégie hybride

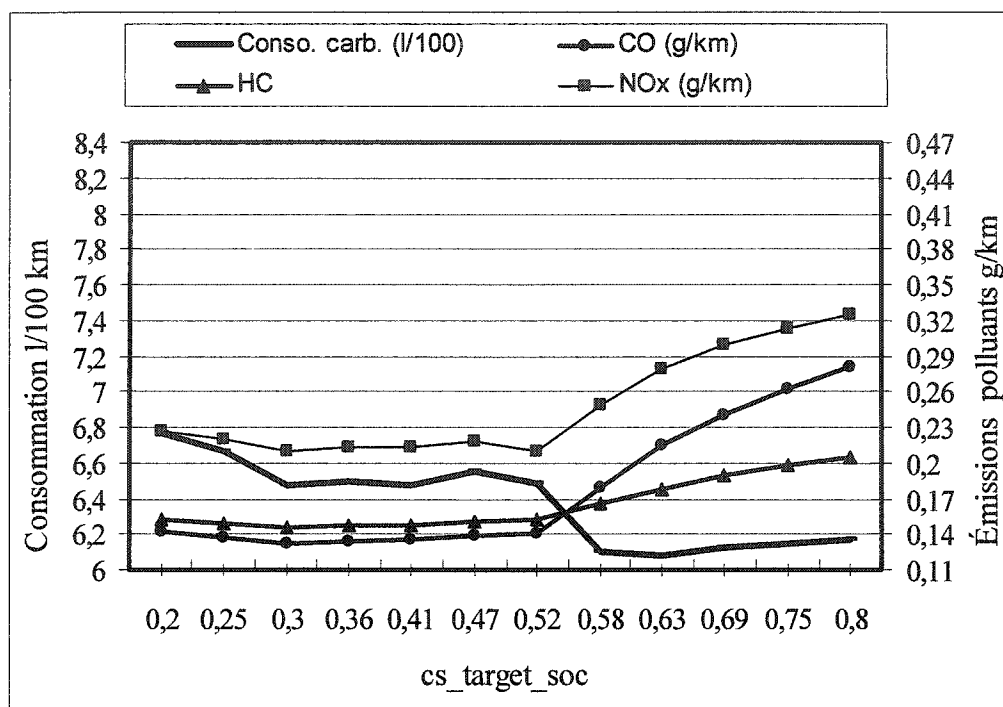
L'influence d'un paramètre de la stratégie hybride dépend fortement du cycle. Ainsi, sur le cycle FTP, *cs_target_soc* et *cs_eng_on_soc* ont plus d'importance que sur le cycle US06. D'une manière générale, les paramètres de la stratégie hybride ont plus d'influence sur les cycles peu intenses. Ceci est attribuable au fait que sur le cycle FTP, la modification d'un paramètre peut entraîner la mise en route et l'utilisation plus fréquente du moteur thermique, alors que sur un cycle intense tel que US06, le moteur est déjà très sollicité et la modification des paramètres n'intervient que dans une plus faible mesure sur la charge du moteur thermique ou sur son temps d'opération.

Pour une même variation de $cs_eng_on_soc$ et de cs_target_soc comprise entre 20 et 80 %, les graphiques 8, 9, 10 et 11 illustrent respectivement les variations de la consommation de carburant, des émissions de CO, de HC et de NO_x sur les cycles US06 et FTP pour le véhicule alimenté à l'octane.



Graphique 8 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de cs_target_soc . Cycle US06. Octane

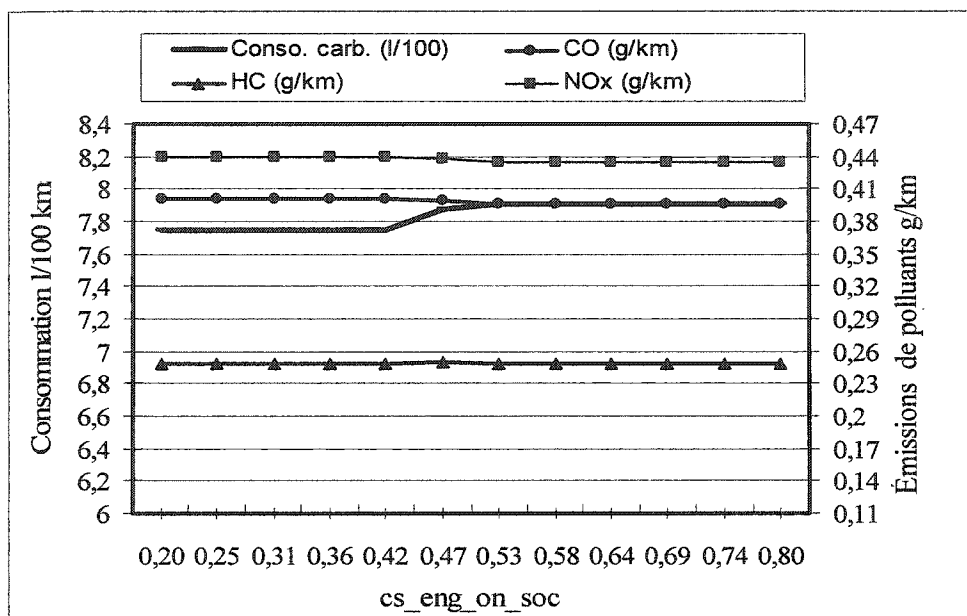
Cs_target_soc , lors de sa variation maximale sur le cycle US06, induit une modification de 11 % de la consommation de carburant (FTP: 10 %), de 15 % des CO (FTP: 50 %), de 14 % des HC (FTP : 28 %) et de 11 % des NO_x (FTP : 34 %). Les graphiques 8 et 9 présentent ces résultats.



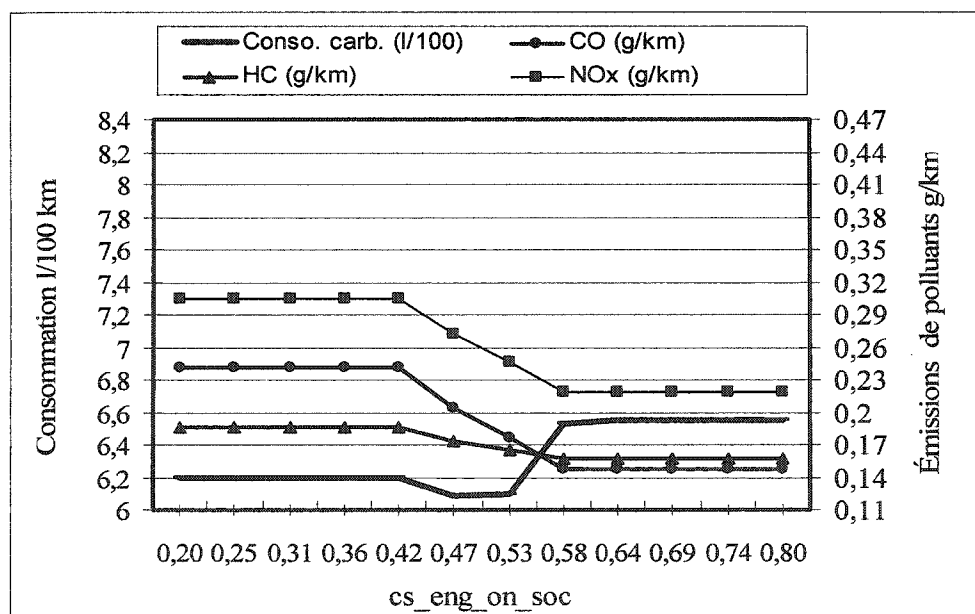
Graphique 9

Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de *cs_target_soc*. Cycle FTP. Octane

La variation de *cs_eng_on_soc* sur le cycle US06, induit une évolution de 2 % de la consommation de carburant (FTP: 7 %), de 1 % des émissions de CO (FTP: 39 %), de 1 % des HC (FTP: 16 %) et 1 % des NO_x (FTP: 28 %). Les graphiques 10 et 11 illustrent ces résultats.



Graphique 10 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de *cs_eng_on_soc*. Cycle US06. Octane



Graphique 11 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de *cs_eng_on_soc*. Cycle FTP. Octane

5.2.1.2 Modification des paramètres de la stratégie hybride

Les graphiques 8 et 9 présentent respectivement la variation de la consommation, des CO, HC et NO_x en fonction de *cs_target_soc* sur le cycle US06 et FTP. Nous pouvons déterminer la valeur optimale du paramètre *cs_target_soc* en fonction du cycle afin de réduire la consommation de carburant ou les émissions polluantes. La variation de consommation ou des émissions polluantes ne suit pas linéairement la variation d'un paramètre. Ainsi, si l'on veut privilégier l'économie de carburant, la valeur optimale pour *cs_target_soc* se situe à 0.35 sur le cycle US06 et à 0.63 sur FTP.

Lors du cycle US06, une diminution du CO, des HC et des NO_x est observée pour *cs_target_soc* variant de 0.2 à 0.38. Puis, pour *cs_target_soc* variant de 0.38 à 0.8, les émissions polluantes augmentent. Le graphique 8 présente ces résultats. L'optimum est dans ce cas facile à déterminer. Il s'agit de *cs_target_soc* fixé à 0.38

Lors du cycle FTP, le graphique 9 présente une valeur minimale pour les émissions polluantes lorsque *cs_target_soc* est fixé à 0.30 pour HC et CO et 0.52 pour les NO_x alors que pour diminuer la consommation de carburant, une valeur de 0.63 est plus appropriée. La valeur optimum est dans ce cas issue d'un compromis entre émissions et consommation de carburant. Pour déterminer *cs_target_soc* sur le cycle FTP, nous observons le graphique 9 et nous sélectionnons la valeur de 0.55, présentant le meilleur compromis. Le tableau XVI présente la valeur retenue pour *cs_target_soc* sur les cycles US06 et FTP.

Tableau XVI

Choix de *cs_target_soc*. Octane

| US06 | FTP |
|------|------|
| 0.38 | 0.55 |

Tel que nous l'observons dans le graphique 10, l'influence de *cs_eng_on_soc* sur les émissions et la consommation de carburant est assez modeste sur le cycle US06. Ce résultat s'explique par le fait que le moteur thermique soit déjà très exploité en configuration d'origine et que la variation de *cs_eng_on_soc* n'induit pas de démarrage plus fréquent ou de sollicitation significativement plus élevée pour le moteur thermique. La valeur optimale minimisant la consommation de carburant se situe à 0.5 sur le cycle FTP alors que sur US06, la consommation est minimisée pour *cs_eng_on_soc* à 0.35.

Sur le cycle FTP, moins intense, l'augmentation de la valeur de *cs_eng_on_soc* entraîne un usage plus important du moteur et une augmentation de la consommation de carburant. Dans ce cas aussi, la valeur idéale pour *cs_eng_on_soc* sera issue d'un compromis entre émissions et consommation de carburant. Nous observons le graphique 11 pour déterminer cette valeur. Le tableau XVII présente la valeur retenue pour *cs_eng_on_soc*.

Tableau XVII

Choix de *cs_eng_on_soc*. Octane

| US06 | FTP |
|------|------|
| 0.35 | 0.52 |

Dans tous les cas, *cs_eng_on_soc* doit être inférieur à *cs_target_soc*, car il est impossible d'avoir un objectif d'état de charge moyen des batteries inférieur au seuil de mise en route du moteur thermique pour assurer la recharge des batteries. Cette condition limite la latitude de choix pour *cs_eng_on_soc*.

Nous avons déterminé les deux paramètres principaux de la stratégie hybride de notre véhicule alimenté à l'octane afin de minimiser les émissions polluantes. Nous allons maintenant simuler le véhicule dont la stratégie hybride adoptera les paramètres présentés précédemment.

Sur le cycle US06, nous fixerons *cs_target_soc* à 0.38 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on_soc* à 0.35 au lieu de 0.50.

Sur le cycle FTP, nous fixerons *cs_target_soc* à 0.55 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on_soc* à 0.52 au lieu de 0.50.

Le tableau XVIII présente une comparaison de la consommation de carburant et des émissions avant et après la modification de la stratégie hybride sur les cycles FTP et US06.

Tableau XVIII

Variations liées à la modification de la stratégie hybride. Octane

| Données | Initiale | | Modifiée | | Écart en % | |
|------------------------|----------|-------|----------|-------|------------|-------|
| | US06 | FTP | US06 | FTP | US06 | FTP |
| Consommation (l/100) | 7.9 | 6.1 | 6.8 | 6.5 | -13.9 | + 6.5 |
| CO (g/km) | 0.396 | 0.193 | 0.351 | 0.142 | -11.3 | -26.4 |
| HC (g/km) | 0.249 | 0.170 | 0.219 | 0.153 | -12.05 | -10 |
| NO _x (g/km) | 0.435 | 0.262 | 0.394 | 0.215 | -9.4 | -17.9 |

Sur le cycle FTP, la consommation a augmenté de 6.5 % pour la version modifiée par rapport à la version initiale. Cependant, toutes les autres données relatives aux émissions polluantes et à la consommation sur le cycle US06 et FTP ont diminué. Le gain le plus significatif atteint -26.4 % sur le CO lors du cycle FTP. Réduire l'objectif de charge moyen des batteries (*cs_target_soc*), ainsi que le seuil de mise en route du moteur

thermique (*cs_eng_on_soc*) à des valeurs optimales permet de diminuer les émissions polluantes.

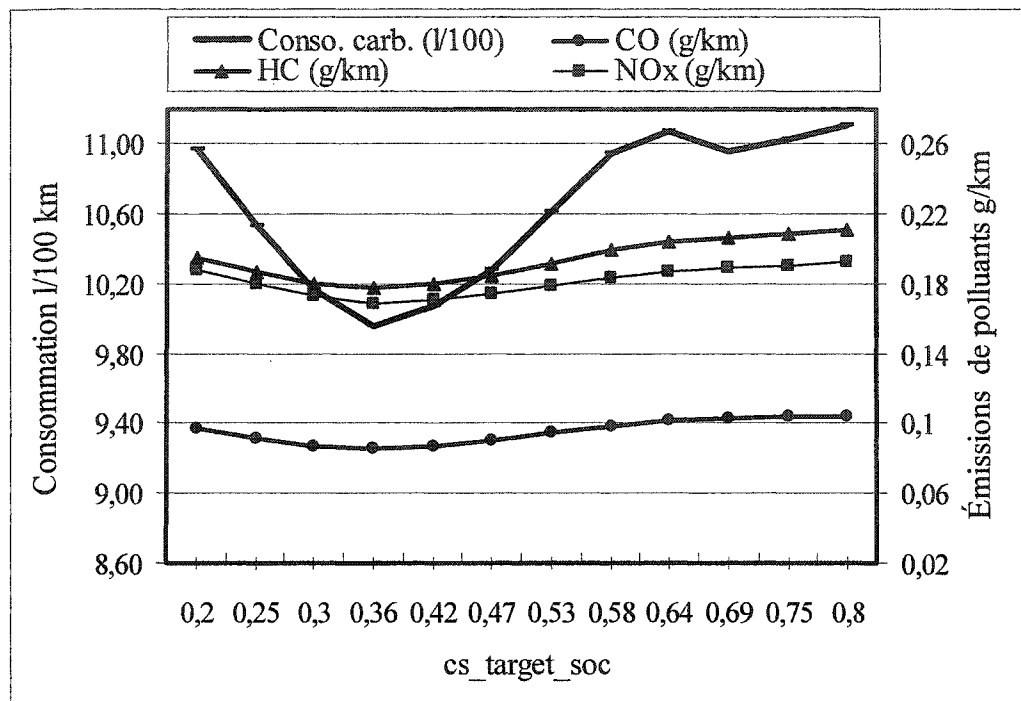
Sur le cycle US06, après modification des paramètres de la stratégie hybride, les fortes accélérations ne sont plus réalisables et le véhicule ne suit pas l'intégralité du cycle intensif US06. La portion du cycle irréalisable est cependant négligeable car elle représente moins de 2% des points du cycle US06. Le cycle FTP est réalisé sans problèmes.

5.2.2 Véhicule alimenté au E85

Le véhicule hybride a déjà été simulé sur les cycles FTP, puis US06 dans sa version utilisant l'octane. Nous allons maintenant alimenter le moteur avec du E85. Comme pour le modèle à l'octane, les paramètres principaux de la stratégie hybride, *cs_target_soc* et *cs_eng_on_soc* seront modifiés afin de réduire les émissions polluantes.

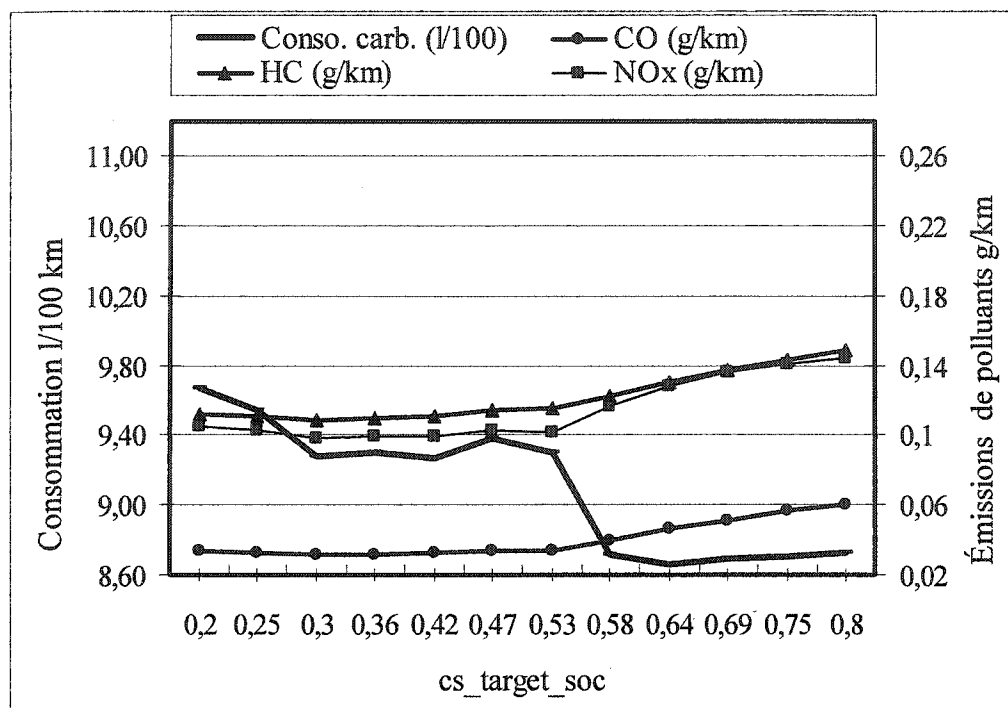
5.2.2.1 Modification des paramètres principaux de la stratégie hybride

La procédure de modification est la même que pour le véhicule alimenté à l'octane. Les graphiques 12 et 13 présentent l'évolution des émissions polluantes et de la consommation de carburant associées à la variation de *cs_target_soc*, le paramètre de la stratégie hybride le plus influent dans le cadre de notre étude. Sur le cycle US06, la valeur optimale se situe à 0.35. Cette valeur permet de réduire la consommation et les émissions.



Graphique 12 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de *cs_target_soc*. Cycle US06. E85

Comme nous l'observons sur le graphique 13, lors du cycle FTP, la valeur optimale de *cs_target_soc* permettant de réduire la consommation de carburant est différente de celle assurant la réduction des émissions polluantes.



Graphique 13 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de *cs_target_soc*. Cycle FTP. E85

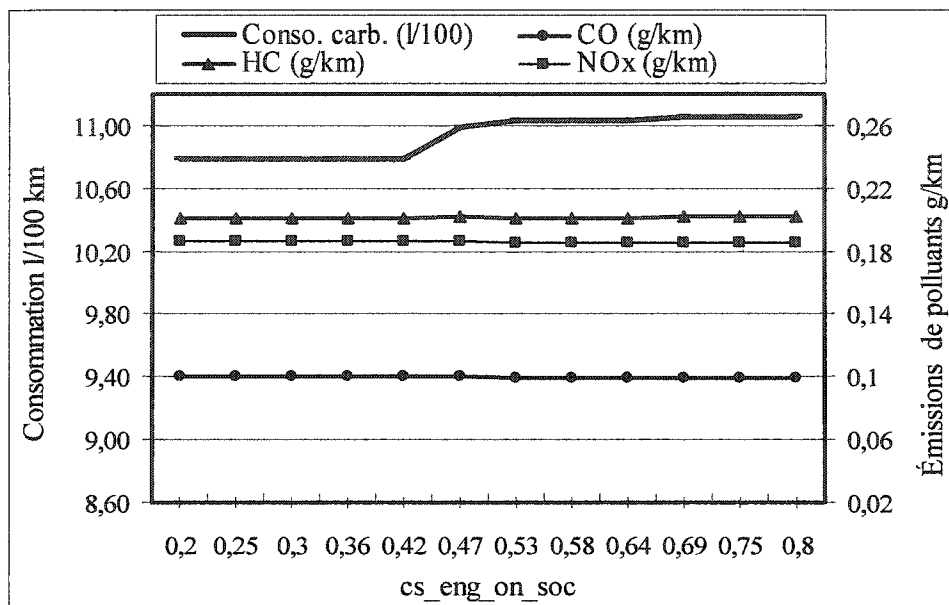
Le tableau XIX présente la valeur retenue pour *cs_target_soc* sur US06 et FTP

Tableau XIX

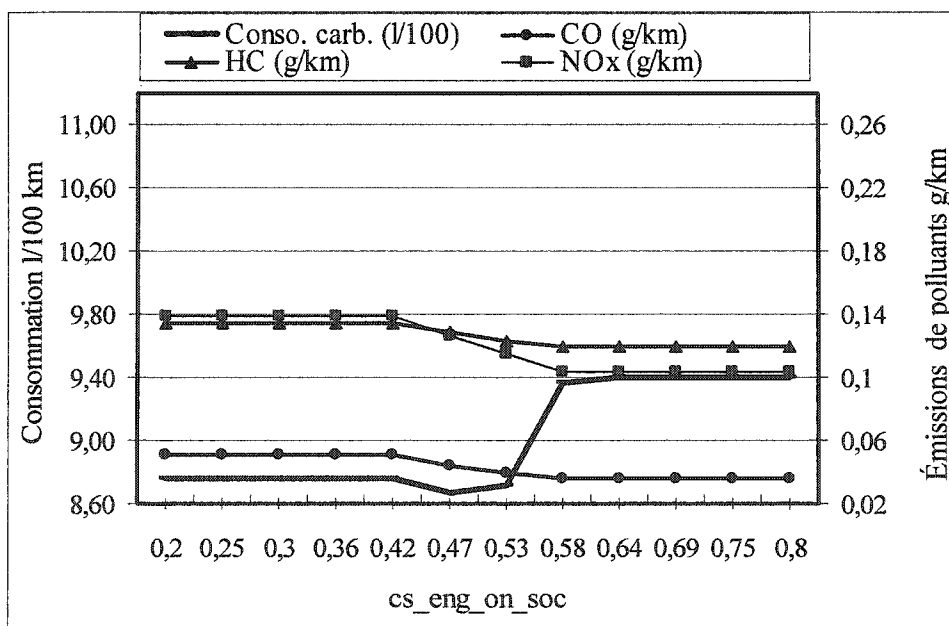
Choix de *cs_target_soc*. E85

| US06 | FTP |
|------|------|
| 0.35 | 0.55 |

Les graphiques 14 et 15 présentent l'évolution des émissions polluantes et de la consommation de carburant associées à la variation de *cs_eng_on_soc* sur les cycles US06 et FTP.



Graphique 14 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de $cs_eng_on_soc$. Cycle US06. E85



Graphique 15 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction de $cs_eng_on_soc$. Cycle FTP. E85

L'observation des graphiques 14 et 15 nous permet de sélectionner les valeurs de *cs_eng_on_soc* assurant le meilleur compromis entre la diminution des émissions polluantes et de la consommation de carburant. Lors du choix de *cs_eng_on_soc*, il faut vérifier que la valeur retenue ne soit pas supérieure à celle de *cs_target_soc*. Nous en avons expliqué les raisons lors du choix de *cs_eng_on_soc* pour l'octane. Le tableau XX présente la valeur retenue pour *cs_eng_on_soc* sur US06 et FTP

Tableau XX

Choix de *cs_eng_on_soc*. E85

| US06 | FTP |
|------|------|
| 0.32 | 0.47 |

Nous avons déterminé les deux paramètres principaux de la stratégie hybride de notre véhicule alimenté au E85 afin de minimiser les émissions polluantes. Nous allons maintenant simuler le véhicule dont la stratégie hybride adoptera les paramètres présentés précédemment.

Sur le cycle US06, nous fixerons *cs_target_soc* à 0.35 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on* à 0.32 au lieu de 0.5.

Sur le cycle FTP, nous fixerons *cs_target_soc* à 0.55 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on* à 0.47 au lieu de 0.50.

Le tableau XXI dresse une comparaison de la consommation de carburant et des émissions polluantes avant et après la modification de la stratégie hybride sur les cycles FTP et US06, lors de l'utilisation du E85.

Tableau XXI

Variations liées à la modification de la stratégie hybride. E85

| Données | Initiale | | Modifiée | | Écart en % | |
|------------------------|----------|-------|----------|-------|------------|------|
| | US06 | FTP | US06 | FTP | US06 | FTP |
| Consommation (l/100) | 11 | 8.7 | 9.5 | 8.7 | -13.6 | 0 |
| CO (g/km) | 0.1 | 0.043 | 0.084 | 0.039 | -16 | -9.3 |
| HC (g/km) | 0.201 | 0.126 | 0.173 | 0.121 | -13.9 | -4 |
| NO _x (g/km) | 0.185 | 0.122 | 0.165 | 0.115 | -10.8 | -5.7 |

Sur le cycle FTP, la consommation de carburant ne varie pas entre la version modifiée et la version initiale. Cependant toutes les autres données ont diminué. La diminution la plus significative atteint -16 % pour le CO lors du cycle US06.

À l'exemple de l'octane, la modification des valeurs de charge moyenne des batteries (*cs_target_soc*), ainsi que le seuil de mise en route du moteur thermique (*cs_eng_on_soc*), ont permis de réduire la consommation et les émissions globales du véhicule hybride alimenté au E85. Sur le cycle US06, après modification des paramètres de la stratégie hybride, les fortes accélérations ne sont plus réalisables et le véhicule ne suit pas l'intégralité du cycle intensif US06. La portion du cycle irréalisable est cependant négligeable. Elle représente moins de 2% des points du cycle US06. Le cycle FTP est réalisé sans problème.

5.2.3 Comparaison et analyse des résultats

a) Passage de l'octane au E85 dans un véhicule dont la stratégie hybride est modifiée.

Le bilan final en terme d'émissions et de consommation de carburant, concernant l'utilisation du E85 en substitution à l'octane, est présenté dans le tableau XXII.

Tableau XXII

Comparaison des émissions et de la consommation pour les véhicules à stratégie hybride modifiée. Octane et E85. Cycles US06 et FTP

| US06 | Octane | E85 | Écart en % |
|------------------------|--------|-------|------------|
| Consommation (l/100) | 6.8 | 9.5 | 39.7 |
| CO (g/km) | 0.351 | 0.084 | -76 |
| HC (g/km) | 0.219 | 0.173 | -21 |
| NO _x (g/km) | 0.394 | 0.165 | -58.1 |
| FTP | Octane | E85 | Écart en % |
| Consommation (l/100) | 6.5 | 8.7 | 33.8 |
| CO (g/km) | 0.142 | 0.039 | -72.5 |
| HC (g/km) | 0.153 | 0.121 | -20.9 |
| NO _x (g/km) | 0.215 | 0.115 | -46.5 |

Comme nous pouvons le voir dans le tableau XXII, pour deux véhicules dont la stratégie hybride est modifiée, le passage de l'octane au E85 donne les résultats suivant :

- une augmentation de 39.7 % et 33.8 % sur la consommation de carburant pour les cycles US06 et FTP respectivement;
- une réduction de 21 % et 20.9 % des émissions de HC pour les cycles US06 et FTP respectivement;
- une réduction de 76 % et 72.5 % des émissions de CO pour les cycles US06 et FTP respectivement;
- une réduction de 58.1 % et 46.5 % des émissions de NO_x pour les cycles US06 et FTP respectivement.

b) Rappel : passage de l'octane au E85 dans un véhicule dont la stratégie hybride n'est pas modifiée.

Lors du passage de l'octane vers le E85, avant modification de la stratégie hybride, les diminutions d'émissions polluantes sont significatives tant sur US06 que FTP. Ainsi,

comme nous l'avons présenté dans les tableaux IX et X, les différences relevées lors du passage de l'octane vers le E85 atteignaient les valeurs suivantes :

- augmentation de 39 % sur US06 et 43 % sur FTP pour la consommation de carburant;
- réduction de 19 % sur US06 et 26 % sur FTP pour les émissions de HC;
- réduction de 75 % sur US06 et 77 % sur FTP pour les émissions de CO;
- réduction de 57 % sur US06 et 53 % sur FTP pour les émissions de NO_x.

c) Variations résultant de la modification de la stratégie hybride.

La modification des paramètres de la stratégie hybride a permis de diminuer les émissions pour l'octane et le E85. Les tableaux XIX et XXII illustraient ces résultats. Cependant, nous avons noté, qu'après modification de la stratégie hybride, certains points du cycle US06 ne peuvent plus être suivis par le véhicule.

Pour le véhicule alimenté à l'octane, la modification de la stratégie hybride permet de réduire les émissions de HC de 12.05 % et 10 %, le CO de 11.3 % et 26.4 %, les NO_x de 9.4 % et 17.9 %, sur US06 et FTP respectivement.

Pour le véhicule alimenté au E85, la modification de la stratégie hybride permet de réduire les émissions de HC de 13.9 % et 4 %, les émissions de CO de 16 % et 9.3 % et les émissions de NO_x de 10.8 % et 5.7 % sur US06 et FTP respectivement.

Nous pouvons donc conclure que, certes, un potentiel de réduction des émissions est exploitable par la modification des stratégies hybrides des véhicules, mais que la majeure partie de la réduction des émissions est assurée par l'utilisation d'un biocarburant en remplacement d'un carburant d'origine fossile. De plus, cette modification des paramètres de la stratégie hybride répondait à l'objectif de diminution de la consommation de carburant et des émissions polluantes. Nous n'avons pas pris en compte l'impact des modifications sur le vieillissement des batteries. Nous savons que la

diminution de l'objectif de charge moyen (*cs_target_soc*) entraîne une décharge plus profonde et une réduction de la durée de vie des batteries. Les valeurs des paramètres de la stratégie hybride avant modification correspondent à celles utilisées par la Toyota Prius. Elles assurent un compromis plus favorable à la durée de vie des batteries.

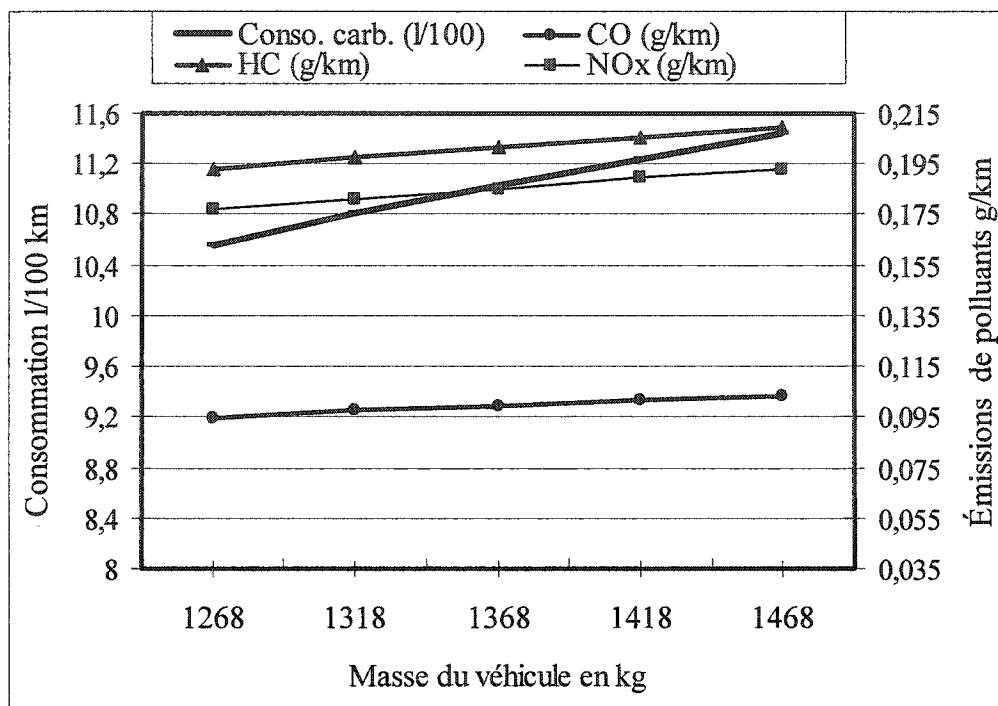
5.3 Influence de la masse du véhicule sur les émissions polluantes

Le véhicule simulé est alimenté au E85. Pour cet essai, nous modifions la masse de +/- 100 kg autour de la masse initiale du véhicule (1368 kg).

Le graphique 16 montre que, pour une augmentation de 100 kg de la masse du véhicule, la consommation passe de 11 à 11.44 litres au 100 km (+ 3.8 %) sur le cycle US06.

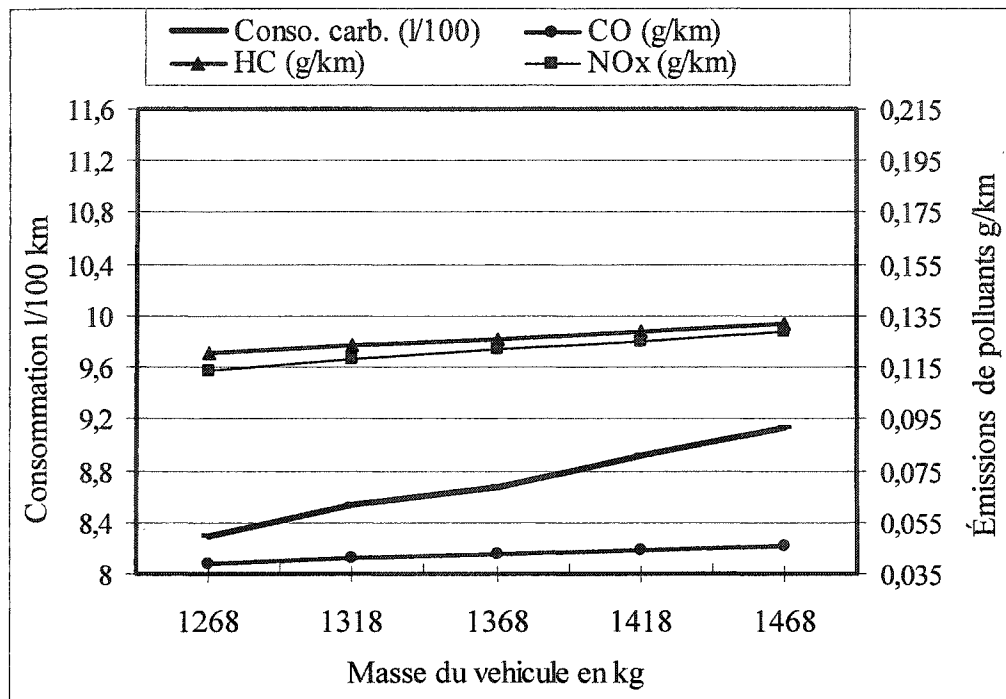
Le graphique 17 présente une augmentation de 8.7 à 9.13 litres aux 100 km (+ 5.3 %) sur le cycle FTP. Le CO augmente de 3.87 % et 7.66 %, les HC de 3.84 % et 4.49 % et les NO_x de 4.32 % et 5.56% sur US06 et FTP respectivement.

L'accroissement de la masse occasionne une augmentation de charge sur le moteur se traduisant par une élévation de la consommation, mais aussi de la température de combustion et de la formation des NO_x.



Graphique 16 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction la masse du véhicule. Cycle US06

Nous notons une augmentation de la consommation de carburant de 3,8 % sur US06 et de 5,3 % sur FTP pour une augmentation de 7,3 % de la masse (100 kg sur 1368 kg). Ceci équivaut à 5,2 % d'augmentation de la consommation sur US06 et de 7,2 % sur FTP pour 10 % d'augmentation de la masse du véhicule. Min (Min, Larsen, Duoba, Ng, & Larsen, 2003) nous indique qu'une augmentation de 10 % de la masse d'un véhicule se traduit par une hausse de 6 % sur la consommation de carburant.



Graphique 17 Variations de la consommation de carburant et des émissions polluantes en fonction la masse du véhicule. Cycle FTP

5.4 Bilan du chapitre 5

Au cours de ce chapitre, nous avons déterminé que la valeur moyenne de l'état de charge, (*cs_target_soc*) ainsi que l'état de charge des batteries en dessous duquel le moteur doit être mis en route, (*cs_eng_on_soc*) sont les deux paramètres les plus importants de la stratégie hybride. Lors de leur variation, ces paramètres ont un impact significatif sur la consommation et les émissions polluantes du véhicule.

Pour les deux carburants, nous avons modifié la stratégie hybride. Ainsi, pour l'octane, nous avons fixé *cs_target_soc* à 0.38 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on_soc* à 0.35 au lieu de 0.50 sur le cycle US06. Sur le cycle FTP, nous fixerons *cs_target_soc* à 0.55 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on_soc* à 0.52 au lieu de 0.50.

Pour le E85, sur le cycle US06, nous fixerons *cs_target_soc* à 0.35 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on* à 0.32 au lieu de 0.5. Sur le cycle FTP, nous fixerons *cs_target_soc* à 0.55 au lieu de 0.56 et *cs_eng_on* à 0.47 au lieu de 0.50.

Les comparaisons établies ont permis d'évaluer la réduction des émissions polluantes liée à la modification de la stratégie hybride ainsi que celles liées au changement de carburant.

La modification de la stratégie hybride, pour le véhicule alimenté à l'octane sur le cycle FTP, a entraîné une augmentation de la consommation de carburant de 6.5 %. Cependant, les émissions polluantes de CO, HC et NO_x ont accusé une réduction significative de -26.4 % pour le CO. Sur le cycle US06, la modification de la stratégie hybride a permis une réduction de la consommation et de l'ensemble des émissions d'environ 11 %.

Pour le véhicule alimenté au E85, sur le cycle FTP, les émissions polluantes de CO, HC et NO_x ont diminué d'une valeur comprise entre 4 et 10 % selon le polluant considéré, alors que la consommation de carburant n'a pas varié. Sur le cycle US06, la modification de la stratégie hybride a permis une réduction de la consommation de carburant de 13.6 % et de l'ensemble des émissions polluantes d'une valeur comprise entre 10.8 et 16 % selon le polluant considéré.

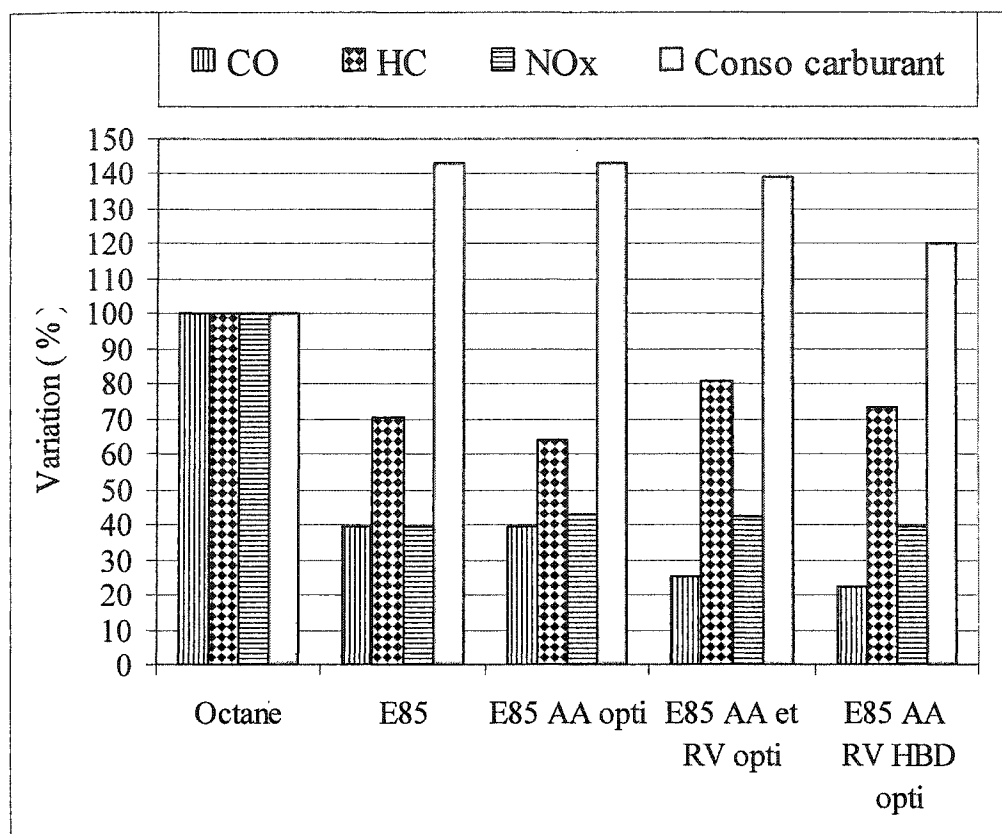
La comparaison des deux véhicules, dont la stratégie hybride est modifiée, permet d'évaluer les gains liés à l'utilisation du E85 par rapport à l'octane sur des véhicules parfaitement adaptés au carburant qu'ils utilisent. Sur US06, le passage de l'octane au E85 permet de réduire les HC de 21 %, le CO de 76 % et les NO_x de 58.1 %. La consommation augmente de 39.7 %. Sur FTP, le passage de l'octane au E85 permet de réduire les HC de 20.9 %, le CO de 72.5 % et les NO_x de 46.5 %. La consommation augmente de 33.8 %.

La masse du véhicule joue un rôle important sur les émissions et la consommation. Ainsi, pour une augmentation de 10 % de la masse du véhicule, la consommation augmente de 5.2 % sur le cycle US06 et de 7.2 % sur le cycle FTP.

Au cours des chapitres quatre et cinq, nous avons modifié successivement le véhicule hybride afin de réduire les émissions polluantes. Dans le but de clarifier l'influence des modifications successives sur les émissions polluantes, résumons ici les variations d'émissions de CO, de HC et de NO_x, après chaque changement apporté sur le véhicule. Le graphique 18 présente les émissions polluantes et la consommation de carburant associées aux modifications du véhicule sur le cycle US06. Les modifications successives étaient les suivantes :

1. Véhicule alimenté à l'octane, stratégie hybride non modifiée: légende « Octane » sur le graphique 18.
2. Passage de l'octane au E85: « E85 » sur graphique 18.
3. Modification de l'avance à l'allumage: « E85 AA opti » sur graphique 18.
4. Augmentation de 9:1 à 11.5:1 du rapport volumétrique : « E85 AA et RV opti » sur graphique 18.
5. Modification de la stratégie hybride pour réduire les émissions : « E85 AA RV HBD opti » sur graphique 18.

La référence de comparaison est le véhicule alimenté à l'octane, utilisant la stratégie hybride de la Toyota Prius en configuration d'origine. Les comparaisons pour les cycles FTP sont disponibles en annexe 5.



Graphique 18 Influence des modifications successives apportées au véhicule sur les émissions polluantes et la consommation de carburant. Cycle US06

La référence de comparaison est le véhicule alimenté avec de l'octane et dont la stratégie hybride n'est pas modifiée (légende Octane). Sur le graphique 18, nous voyons que le passage de l'octane au E85, pour des véhicules non modifiés -aucune variation de l'avance à l'allumage, du rapport volumétrique ou de la stratégie hybride- constitue le changement ayant le plus de poids, tant sur la réduction des émissions de polluants que sur l'augmentation de la consommation de carburant. Sur le cycle US06, et tel que montré dans le graphique 18 nous avons obtenu les résultats suivants :

- réduction des CO de 60 %;
- réduction des HC de 30 %;
- réduction des NO_x de 60 %;
- la consommation augmente de 43 %.

La modification des paramètres du moteur tels que l'avance à l'allumage, le rapport volumétrique et l'amélioration de la stratégie hybride, joue un rôle secondaire dans la variation des émissions polluantes ou de la consommation de carburant. En comparant un véhicule sans aucune modification mais alimenté au E85, (« E85 » sur le graphique 18), et le véhicule avec toutes les modifications tant du moteur que de la stratégie hybride (« E85 AA RV HBD opti » sur le graphique 18), nous obtenons les variations suivantes :

- diminution des CO de 17 %;
- augmentation des HC de 4 %;
- aucune variation des NO_x;
- diminution de la consommation de carburant de 22 %.

La réduction globale des émissions est un compromis entre la réduction individuelle de chaque polluant. Ainsi, lors de l'augmentation du rapport volumétrique de 9:1 à 11:1, le CO diminue mais les HC augmentent. À ce sujet, nous l'avons spécifié au cours du chapitre 4, Sodré (Sodré & Yates, 1996) présente la même tendance que celle relevée au cours de notre simulation.

La masse du véhicule est un acteur important dans la variation des émissions polluantes et de la consommation de carburant. Il est essentiel d'y accorder autant d'importance qu'aux diverses améliorations du moteur ou de la stratégie hybride.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet consistait à évaluer la réduction des émissions polluantes grâce à l'utilisation du biocarburant E85, dans un véhicule hybride électrique. La réduction des émissions est évaluée par rapport à l'usage d'un carburant fossile, l'octane, dans un véhicule hybride électrique. L'ensemble de l'étude a été conduit à l'aide de simulations informatiques. Nous avons jugé que les outils de simulation disponibles étaient suffisamment éprouvés et que nous pouvions leur attribuer un niveau de confiance acceptable. Ces outils ont été utilisés au cours de nombreux autres projets de recherche. À ce sujet, des références ont été présentées au chapitre 2.

Pour réaliser ce projet, nous avons tout d'abord ciblé le véhicule hybride de référence: il s'agit de la Toyota Prius. Ce véhicule a déjà fait l'objet de plusieurs études. Une modélisation de la Toyota Prius dans sa configuration originale est disponible dans le logiciel de simulation de véhicule, ADVISOR. Nous avons utilisé ce modèle comme base de départ pour élaborer notre véhicule de simulation alimenté avec le biocarburant E85. Cette étude est présentée au cours des quatrième et cinquième chapitres.

Dans le troisième chapitre, nous avons modélisé le moteur thermique alimenté avec le biocarburant E85. Les tables d'émissions polluantes et de consommation de carburant du moteur, nécessaires à la simulation du véhicule complet, ont été obtenues à l'aide de simulations informatiques réalisées avec le logiciel Ricardo Wave. Pour effectuer ces simulations, nous devons connaître de nombreuses caractéristiques physiques du moteur, comme le diamètre des pistons, la longueur de bielle, l'épure de distribution, la longueur des conduits d'admission et d'échappement ou encore l'espace entre le segment de feu et le segment d'étanchéité. Pour déterminer toutes les données nécessaires, nous avons démonté et mesuré les dimensions sur un moteur identique à celui devant être modélisé. La Toyota Prius est équipée d'un moteur 1.5 litre. Comme il

nous était financièrement impossible de nous procurer un moteur de Toyota Prius, nous avons décidé de choisir un moteur Honda de même cylindrée.

Au cours des simulations, le dosage du carburant a toujours été maintenu à la stœchiométrie, tant pour l'octane que pour le E85. De plus, lors de la conversion au E85, nous avons adapté la durée de combustion. Pour exploiter le gain en indice d'octane du E85, nous avons augmenté le rapport volumétrique de 9:1 à 11.5:1. La plage de régime d'utilisation du moteur a été réduite à celle de la Prius, soit entre 1000 et 4000 tr/min, pour différentes ouvertures du papillon des gaz. À l'issue des simulations, nous avons élaboré les tables d'émissions polluantes pour le CO, les HC, les NO_x ainsi que la table de consommation de carburant. Ces tables se présentent sous forme de matrices composées de 12 points de régime moteur et 12 points de couple.

Au cours du quatrième chapitre, les tables d'émissions et de consommation de carburant définies précédemment pour l'octane et le E85 ont été programmées dans le logiciel ADVISOR. Nous pouvions dorénavant simuler la Toyota Prius équipée de son « nouveau » moteur. Pour évaluer ce véhicule, nous avons choisi deux cycles d'essais normalisés : le cycle FTP, représentant une conduite modérée, puis le cycle US06, correspondant à une conduite plus agressive. Notons que les vitesses et les accélérations imposées par le cycle US06 nous paraissent plus représentatives de la conduite automobile actuelle.

Une première série d'essais a été menée en remplaçant simplement le moteur de la Prius par le moteur Honda simulé, alimenté avec de l'octane puis du E85. Pour l'adaptation complète du moteur au E85, nous avons procédé par étape afin d'évaluer l'apport de chaque modification successive (changement de carburant, modification de l'avance à l'allumage, augmentation du rapport volumétrique), tout en conservant la stratégie hybride dans sa configuration d'origine.

Lors du cinquième chapitre, nous avons modifié la stratégie hybride du véhicule dans le but de réduire les émissions polluantes. Tout d'abord, nous avons remarqué que la réduction majeure des émissions polluantes était imputable au remplacement de l'octane par le E85. Les modifications successives de l'avance à l'allumage, du rapport volumétrique ainsi que de la stratégie hybride contribuent dans une moindre mesure aux variations des émissions polluantes ou de la consommation de carburant.

La comparaison entre deux véhicules hybrides modifiés (moteur et stratégie hybride), l'un alimenté à l'octane et l'autre alimenté au E85, sur les cycles US06 et FTP, a donné les résultats suivants :

- une diminution du CO de 76 % sur US06 et 72.5 % sur FTP, lors du passage de l'octane vers le E85;
- une diminution des HC de 21 % sur US06 et 20.9 % sur FTP, lors du passage de l'octane vers le E85;
- une diminution des NO_x de 58.1 % sur US06 et de 46.5 % sur FTP, lors du passage de l'octane vers le E85;
- une augmentation de la consommation de carburant de 39.7 % sur US06 et de 33.8 % sur FTP, lors du passage de l'octane vers le E85.

Ces résultats constituent l'évaluation finale de la variation des émissions polluantes et de la consommation de carburant, associée à l'utilisation du biocarburant E85 en remplacement de l'octane, dans un véhicule hybride électrique dont le moteur thermique et la stratégie hybride sont optimisés pour chaque carburant.

RECOMMANDATIONS

Afin d'approfondir la recherche et de donner suite à ce projet, nous recommandons d'évaluer les points suivants :

- utiliser l'injection directe avec charge stratifiée pour le moteur à allumage commandé implanté dans un véhicule hybride alimenté au E85;
- utiliser un moteur de plus petite cylindrée. Le gain de couple lié à l'utilisation du E85 permet de réduire la taille du moteur;
- vérifier l'influence du vieillissement des batteries sur les émissions polluantes et la consommation de carburant du véhicule.

COMMUNICATION ET PUBLICATION

Une conférence est prévue pour le mois d'octobre 2005.

Titre de la conférence :

2005 POWERTRAIN & FLUID SYSTEMS CONFERENCE, October 24 - 27. San Antonio, Texas.

Le titre du résumé déposé en février 2005 est le suivant :

comparison of Emissions and Fuel Consumption between Octane and E85 in a Simulated Hybrid Electric Vehicle.

Un article est en cours de rédaction. Il sera soumis au comité de sélection du magazine, International Journal of Vehicle Design (IJVD), pour le prochain numéro spécial consacré aux véhicules hybrides.

Le titre est le suivant :

Influence of battery aging on pollutant emissions of a hybrid electric vehicle.

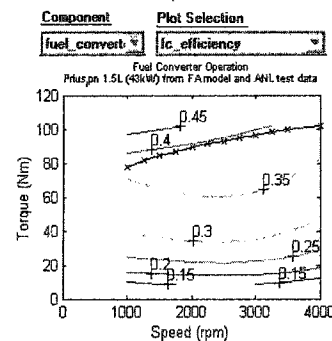
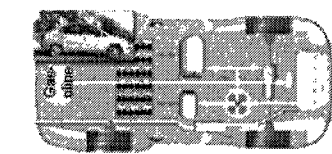
ANNEXE 1

Modélisation d'un véhicule avec ADVISOR

Lors de l'ouverture de ADVISOR, la fenêtre de sélection suivante est affichée. Cette fenêtre permet de charger un fichier correspondant au véhicule à modéliser. Il est aussi possible de définir son propre véhicule « à la carte » en choisissant une configuration personnelle pour les sections suivantes :

- transmission de puissance : drivetrain Config
- type de véhicule : vehicle
- type de moteur : fuel converter
- type de batterie dans le cas d'un hybride électrique : energy storage
- stratégie de contrôle du véhicule hybride : power train control

Vehicle Input



Load File: PRIUS_JPN_defaults.jp

Drivetrain Config: prius_jpn

| | version | type | max rpm | peak eff | mass (kg) |
|--------------------|---------|-----------------|------------|-------------|--------------|
| Vehicle | 1 | VEH_PRIUS_JPN | | | 918 |
| Fuel Converter | 1 | FC_PRIUS_JPN | 43 | 0.3 | 137 |
| Exhaust Aftertreat | 1 | EX_SI | | | 11 |
| Energy Storage | 1 | ESS_NIMH6 | 40 | 308 | 40 |
| Motor | 1 | MC_PRIUS_JPN | 31 | 0.9 | 67 |
| Generator | 1 | GC_PRIUS_JPN | 15 | 0.84 | 59 |
| Transmission | 1 | TX_PRIUS_CVT_JP | | 0 | 0 |
| Wheel/Axle | 1 | WH_PRIUS_JPN | | | 0 |
| Accessory | 1 | ACC_PRIUS_JPN | | | |
| Powertrain Control | 1 | PTC_PRIUS_JPN | | | |

new Block Diagram: BD_PRIUS_JPN

Variable: fuel_converter Edit Var

Variable: fc_acc_mass 24 1709

Save Help

Back Continue

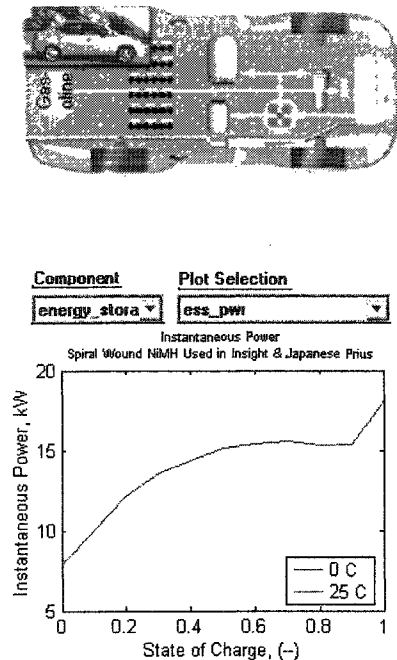
La simulation du véhicule est basée sur des données expérimentales ou des grandeurs physiques. Ces données régissent les principaux sous-systèmes servant à définir le véhicule.

Les sous-systèmes sont les suivants :

- Fuel converter (Moteur, carburant)
- Generator (Générateur/moteur électrique)
- Motor controler (Contrôleur du moteur électrique)
- Energy storage (Batteries et accumulateur d'énergie)
- Powertrain control (Stratégie de contrôle hybride)
- Transmission (Type de transmission, CVT, manuel, automatique)
- Wheel (Roue, diamètre, inertie...)
- Accessory (puissance des accessoires)
- Vehicle (aérodynamique, masse...)
- Exhaust after treat (informations sur le catalyseur)

Chaque sous-système utilise des variables accessibles sous le titre **Variables** au bas de la fenêtre intitulée « vehicle Input ». Cette fenêtre est montrée à la page suivante. Les sous-systèmes sont sélectionnés à l'aide de l'onglet **Component**. Puis pour chaque **Component** sélectionné, les variables associées deviennent accessibles et modifiables.

Vehicle Input



| Load File | | PRIUS_JPN_defaults_in | | Auto-Size | |
|--|---------|-----------------------|------|-----------|------|
| Drivetrain Config | | prius_jpn | | Scale | |
| | version | type | max | peak | mass |
| | | | (kW) | (kW) | (kg) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Vehicle | ? | VEH_PRIUS_JPN | | | 918 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Fuel Converter | fc | FC_PRIUS_JPN | 43 | 0.3 | 137 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Exhaust Aftertreat | ? | EX_SI | | | 11 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Energy Storage | int | ESS_NIMHS | 40 | 308 | 40 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Motor | ? | MC_PRIUS_JPN | 31 | 0.9 | 57 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Generator | reg | GC_PRIUS_JPN | 15 | 0.84 | 33 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Transmission | pgc | TX_PRIUS_CVT_JP | | 0 | 0 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Wheel/Axle | cn | WH_PRIUS_JPN | | | 0 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Accessory | con | ACC_PRIUS_JPN | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Powertrain Control | pri | PTC_PRIUS_JPN | | | |

Cargo: 136
 Calculated: 1332
☒ override mass: 1368

View Block Diagram: BD_PRIUS_JPN

Variable: fuel_converter
 Variables: fc_max_pwr 42.7136

Edit Var: 42.7136

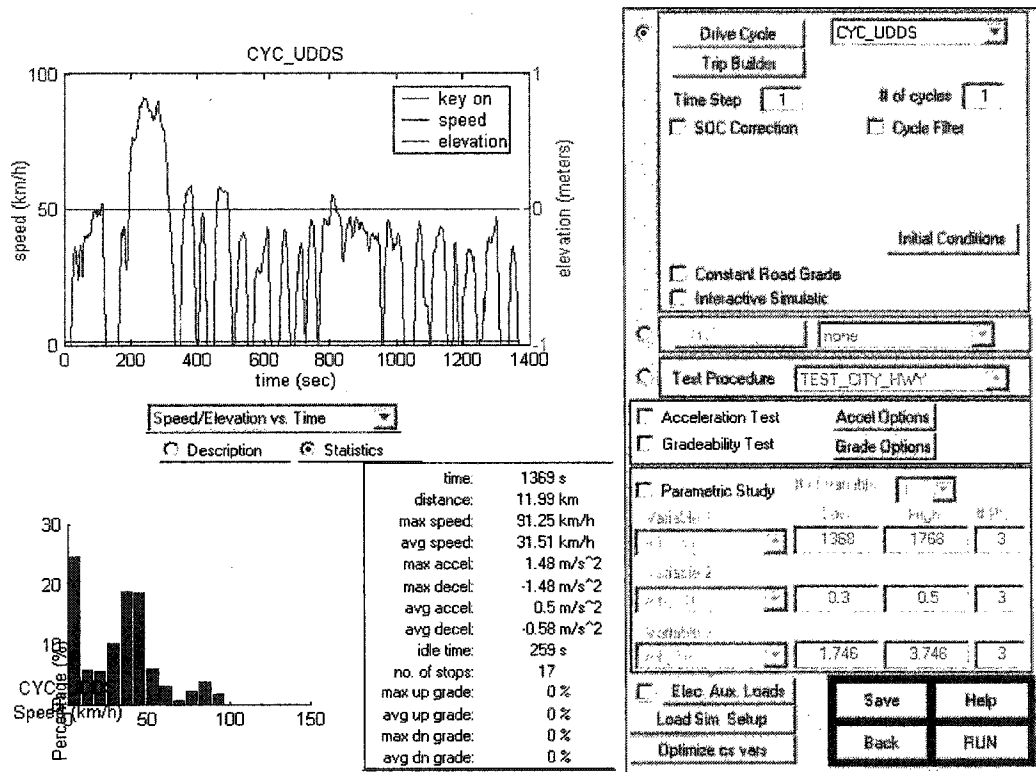
Save Help
 Back Continue

Zone de sélection des sous-systèmes et des variables

En tout temps, la valeur d'un variable en rapport avec le véhicule testé peut être connue. Il suffit de taper le nom de cette variable dans la fenêtre de commande de Matlab.

Après avoir sélectionné le type de véhicule, nous passons à la fenêtre de simulation d'ADVISOR pour choisir les paramètres de simulation. Cette fenêtre est montrée à la page suivante. Le bouton « Drive Cycle » permet de sélectionner le cycle routier souhaité. Les conditions initiales (température ambiante, température du moteur, température du catalyseur, état de charge des batteries...) peuvent être modifiées ou choisies par défaut.

Fenêtre de simulation



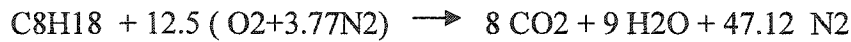
Après sélection du cycle, nous pouvons lancer la simulation par sélection du bouton « Run ». ADVISOR calcule alors la consommation et les émissions polluantes sur le cycle d'essai routier sélectionné.

ANNEXE 2

Équation de combustion, calcul du rapport stœchiométrique pour l'octane et le E85

1) Équation de combustion, calcul du rapport stœchiométrique pour l'octane

L'équation de combustion de l'octane est la suivante :



Le rapport stœchiométrique se calcule de la façon suivante :

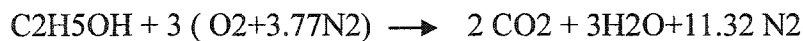
$$\frac{\text{Masse Carburant}}{\text{Masse d'air}} = \frac{(\text{C}_8\text{H}_{18})}{12.5 (\text{O}_2 + 3.77 \text{N}_2)} = \frac{114}{12.5 (32 + 3.77 * 28.16)} = 0.066$$

D'où le rapport air / essence suivant :

$$\frac{\text{Masse d'air}}{\text{Masse d'essence}} = \frac{1}{0.066} = 15.1$$

2) Équation de combustion, calcul du rapport stœchiométrique pour l'éthanol.

La combustion de l'éthanol ne s'effectue pas avec le même ratio air / essence que celle de l'essence ou de l'octane. L'équation de combustion de l'éthanol est la suivante :



Le rapport stœchiométrique se calcul de la façon suivante :

$$\frac{\text{Masse Carburant}}{\text{Masse d'air}} = \frac{(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})}{3 (\text{O}_2 + 3.77 \text{N}_2)} = \frac{46}{3 (32 + 3.77 * 28.16)} = 0.1109$$

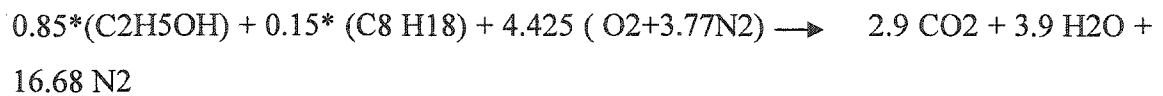
D'où le rapport air /essence suivant :

$$\frac{\text{Masse d'air}}{\text{Masse d'essence}} = \frac{1}{0.1109} = 9.0$$

Selon la teneur en éthanol dans le mélange, le rapport stœchiométrique se trouvera entre la valeur de l'octane (1/15.1) et celle de l'éthanol pur (1/9).

3) Équation de combustion, calcul du rapport stœchiométrique pour le E85

L'équation de combustion du E85 est la suivante :



Le rapport stœchiométrique se calcule de la façon suivante :

$$\frac{\text{Masse Carburant}}{\text{Masse d'air}} = \frac{0.85*(C_2H_5OH) + 0.15*(C_8H_{18})}{4.425(O_2 + 3.77N_2)} = \frac{56.2}{611.37} = 0.0919$$

D'où le rapport air essence suivant :

$$\frac{\text{Masse d'air}}{\text{Masse d'essence}} = \frac{1}{0.0919} = 10.88$$

Pour le E85, réalisé à partir d'éthanol et d'octane, le rapport stœchiométrique vaut 10.88.

ANNEXE 3

Cartographies d'émissions et de consommation de carburant pour l'octane et le E85

Débit de CO en g/s. Alimentation à l'octane

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1000 tr/min | 0,0001 | 0,0010 | 0,0007 | 0,0050 | 0,0060 | 0,0070 | 0,0116 | 0,0147 | 0,0214 | 0,0239 | 0,0291 | 0,0304 |
| 1250 tr/min | 0,0001 | 0,0030 | 0,0062 | 0,0104 | 0,0130 | 0,0155 | 0,0205 | 0,0263 | 0,0309 | 0,0381 | 0,0408 | 0,0454 |
| 1500 tr/min | 0,0005 | 0,0067 | 0,0117 | 0,0186 | 0,0206 | 0,0263 | 0,0339 | 0,0408 | 0,0467 | 0,0516 | 0,0595 | 0,0658 |
| 1750 tr/min | 0,0071 | 0,0127 | 0,0172 | 0,0226 | 0,0297 | 0,0399 | 0,0492 | 0,0577 | 0,0647 | 0,0704 | 0,0760 | 0,0841 |
| 2000 tr/min | 0,0071 | 0,0131 | 0,0199 | 0,0320 | 0,0395 | 0,0564 | 0,0607 | 0,0766 | 0,0809 | 0,0913 | 0,0980 | 0,1063 |
| 2250 tr/min | 0,0093 | 0,0202 | 0,0291 | 0,0402 | 0,0535 | 0,0653 | 0,0732 | 0,0874 | 0,0923 | 0,1053 | 0,1190 | 0,1278 |
| 2500 tr/min | 0,0155 | 0,0278 | 0,0407 | 0,0524 | 0,0691 | 0,0779 | 0,0953 | 0,1037 | 0,1170 | 0,1347 | 0,1459 | 0,1530 |
| 2750 tr/min | 0,0208 | 0,0420 | 0,0589 | 0,0718 | 0,0893 | 0,0990 | 0,1093 | 0,1293 | 0,1352 | 0,1514 | 0,1661 | 0,1750 |
| 3000 tr/min | 0,0291 | 0,0500 | 0,0686 | 0,0835 | 0,0983 | 0,1090 | 0,1294 | 0,1524 | 0,1664 | 0,1846 | 0,1965 | 0,2032 |
| 3250 tr/min | 0,0362 | 0,0556 | 0,0754 | 0,0919 | 0,1119 | 0,1223 | 0,1458 | 0,1771 | 0,1839 | 0,2005 | 0,2160 | 0,2249 |
| 3500 tr/min | 0,0434 | 0,0744 | 0,0956 | 0,1135 | 0,1308 | 0,1513 | 0,1714 | 0,1980 | 0,2152 | 0,2339 | 0,2461 | 0,2534 |
| 4000 tr/min | 0,0760 | 0,1107 | 0,1281 | 0,1642 | 0,1843 | 0,2034 | 0,2255 | 0,2412 | 0,2695 | 0,2885 | 0,3009 | 0,3079 |

Débit de HC en g/s. Alimentation à l'octane

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1000 tr/min | 0,0005 | 0,0016 | 0,0027 | 0,0040 | 0,0047 | 0,0058 | 0,0069 | 0,0079 | 0,0096 | 0,0102 | 0,0114 | 0,0117 |
| 1250 tr/min | 0,0025 | 0,0039 | 0,0046 | 0,0063 | 0,0070 | 0,0081 | 0,0096 | 0,0110 | 0,0121 | 0,0137 | 0,0143 | 0,0153 |
| 1500 tr/min | 0,0037 | 0,0048 | 0,0067 | 0,0089 | 0,0098 | 0,0110 | 0,0127 | 0,0142 | 0,0155 | 0,0165 | 0,0182 | 0,0194 |
| 1750 tr/min | 0,0050 | 0,0070 | 0,0084 | 0,0093 | 0,0118 | 0,0140 | 0,0159 | 0,0177 | 0,0192 | 0,0204 | 0,0215 | 0,0231 |
| 2000 tr/min | 0,0048 | 0,0071 | 0,0090 | 0,0122 | 0,0138 | 0,0172 | 0,0181 | 0,0212 | 0,0215 | 0,0242 | 0,0256 | 0,0274 |
| 2250 tr/min | 0,0066 | 0,0088 | 0,0113 | 0,0139 | 0,0163 | 0,0190 | 0,0212 | 0,0233 | 0,0249 | 0,0268 | 0,0294 | 0,0314 |
| 2500 tr/min | 0,0086 | 0,0104 | 0,0138 | 0,0158 | 0,0196 | 0,0221 | 0,0246 | 0,0270 | 0,0289 | 0,0320 | 0,0347 | 0,0365 |
| 2750 tr/min | 0,0089 | 0,0141 | 0,0151 | 0,0199 | 0,0215 | 0,0259 | 0,0272 | 0,0309 | 0,0316 | 0,0348 | 0,0379 | 0,0402 |
| 3000 tr/min | 0,0103 | 0,0143 | 0,0169 | 0,0203 | 0,0239 | 0,0282 | 0,0321 | 0,0337 | 0,0371 | 0,0408 | 0,0435 | 0,0459 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3250 tr/min | 0,0143 | 0,0159 | 0,0205 | 0,0226 | 0,0271 | 0,0310 | 0,0334 | 0,0386 | 0,0390 | 0,0431 | 0,0464 | 0,0493 |
| 3500 tr/min | 0,0142 | 0,0201 | 0,0211 | 0,0274 | 0,0290 | 0,0342 | 0,0368 | 0,0402 | 0,0453 | 0,0493 | 0,0525 | 0,0550 |
| 4000 tr/min | 0,0202 | 0,0221 | 0,0272 | 0,0285 | 0,0315 | 0,0426 | 0,0398 | 0,0488 | 0,0544 | 0,0587 | 0,0621 | 0,0650 |

Débit de NO en g/s. Alimentation à l'octane

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1000 tr/min | 0,0002 | 0,0006 | 0,0026 | 0,0073 | 0,0072 | 0,0111 | 0,0223 | 0,0300 | 0,0443 | 0,0502 | 0,0639 | 0,0673 |
| 1250 tr/min | 0,0008 | 0,0047 | 0,0062 | 0,0128 | 0,0194 | 0,0219 | 0,0321 | 0,0418 | 0,0503 | 0,0647 | 0,0708 | 0,0809 |
| 1500 tr/min | 0,0021 | 0,0049 | 0,0105 | 0,0204 | 0,0220 | 0,0324 | 0,0436 | 0,0546 | 0,0645 | 0,0733 | 0,0882 | 0,0999 |
| 1750 tr/min | 0,0039 | 0,0088 | 0,0120 | 0,0216 | 0,0299 | 0,0427 | 0,0556 | 0,0679 | 0,0790 | 0,0891 | 0,0976 | 0,1116 |
| 2000 tr/min | 0,0030 | 0,0072 | 0,0131 | 0,0265 | 0,0345 | 0,0493 | 0,0601 | 0,0818 | 0,0836 | 0,1033 | 0,1133 | 0,1275 |
| 2250 tr/min | 0,0062 | 0,0106 | 0,0150 | 0,0292 | 0,0391 | 0,0558 | 0,0725 | 0,0828 | 0,0966 | 0,1118 | 0,1253 | 0,1395 |
| 2500 tr/min | 0,0084 | 0,0138 | 0,0247 | 0,0330 | 0,0512 | 0,0696 | 0,0801 | 0,0995 | 0,1070 | 0,1285 | 0,1453 | 0,1577 |
| 2750 tr/min | 0,0076 | 0,0221 | 0,0292 | 0,0432 | 0,0558 | 0,0781 | 0,0910 | 0,1078 | 0,1179 | 0,1327 | 0,1521 | 0,1668 |
| 3000 tr/min | 0,0094 | 0,0197 | 0,0349 | 0,0454 | 0,0626 | 0,0859 | 0,1053 | 0,1207 | 0,1342 | 0,1483 | 0,1683 | 0,1857 |
| 3250 tr/min | 0,0170 | 0,0260 | 0,0380 | 0,0515 | 0,0677 | 0,0945 | 0,1100 | 0,1314 | 0,1418 | 0,1572 | 0,1770 | 0,1915 |
| 3500 tr/min | 0,0150 | 0,0326 | 0,0403 | 0,0615 | 0,0753 | 0,0951 | 0,1178 | 0,1345 | 0,1567 | 0,1791 | 0,1961 | 0,2086 |
| 4000 tr/min | 0,0269 | 0,0365 | 0,0529 | 0,0654 | 0,0820 | 0,1113 | 0,1272 | 0,1591 | 0,1888 | 0,2125 | 0,2312 | 0,2452 |

Débit de carburant en g/s. Alimentation à l'octane

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1000 tr/min | 0,1264 | 0,1859 | 0,2454 | 0,3394 | 0,3447 | 0,4091 | 0,4737 | 0,5293 | 0,6203 | 0,6557 | 0,7326 | 0,7509 |
| 1250 tr/min | 0,2170 | 0,2824 | 0,3478 | 0,4411 | 0,4626 | 0,5259 | 0,6047 | 0,6743 | 0,7337 | 0,8280 | 0,8656 | 0,9259 |
| 1500 tr/min | 0,2589 | 0,3592 | 0,4517 | 0,5559 | 0,6000 | 0,6850 | 0,7453 | 0,8260 | 0,8966 | 0,9572 | 1,0559 | 1,1303 |
| 1750 tr/min | 0,3230 | 0,4568 | 0,5420 | 0,6070 | 0,6831 | 0,7920 | 0,8930 | 0,9850 | 1,0659 | 1,1366 | 1,1976 | 1,2960 |
| 2000 tr/min | 0,3596 | 0,4565 | 0,5940 | 0,6929 | 0,7664 | 0,9393 | 0,9817 | 1,1240 | 1,1880 | 1,3115 | 1,3870 | 1,4952 |
| 2250 tr/min | 0,4473 | 0,5441 | 0,6702 | 0,7680 | 0,8795 | 1,0082 | 1,1310 | 1,2250 | 1,3433 | 1,4087 | 1,5533 | 1,6670 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2500 tr/min | 0,5000 | 0,6219 | 0,7658 | 0,8516 | 1,0261 | 1,1590 | 1,2723 | 1,4052 | 1,4872 | 1,6000 | 1,7984 | 1,9054 |
| 2750 tr/min | 0,5440 | 0,7230 | 0,8398 | 0,9750 | 1,1152 | 1,3139 | 1,3980 | 1,5604 | 1,6285 | 1,7643 | 1,9298 | 2,0602 |
| 3000 tr/min | 0,6302 | 0,7707 | 0,9219 | 1,0910 | 1,2221 | 1,4238 | 1,5560 | 1,7000 | 1,8502 | 1,9950 | 2,1968 | 2,3194 |
| 3250 tr/min | 0,7701 | 0,9040 | 1,0415 | 1,1462 | 1,3456 | 1,5512 | 1,6445 | 1,8730 | 1,9820 | 2,1570 | 2,3380 | 2,4534 |
| 3500 tr/min | 0,8390 | 0,9820 | 1,1011 | 1,3000 | 1,4425 | 1,6670 | 1,8122 | 1,9564 | 2,2072 | 2,4130 | 2,5791 | 2,7119 |
| 4000 tr/min | 1,0400 | 1,1370 | 1,3436 | 1,4790 | 1,6530 | 1,9890 | 2,1700 | 2,3351 | 2,5996 | 2,8170 | 2,9941 | 3,1400 |

Débit de CO en g/s. Alimentation au E85

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1000 tr/min | 0,00009 | 0,00027 | 0,00060 | 0,00127 | 0,00213 | 0,00261 | 0,00304 | 0,00405 | 0,00459 | 0,00495 | 0,00524 | 0,00552 |
| 1250 tr/min | 0,00028 | 0,00078 | 0,00165 | 0,00277 | 0,00351 | 0,00433 | 0,00600 | 0,00649 | 0,00720 | 0,00828 | 0,00878 | 0,00907 |
| 1500 tr/min | 0,00076 | 0,00186 | 0,00323 | 0,00420 | 0,00543 | 0,00800 | 0,00870 | 0,01007 | 0,01148 | 0,01258 | 0,01305 | 0,01355 |
| 1750 tr/min | 0,00191 | 0,00363 | 0,00476 | 0,00567 | 0,00960 | 0,01037 | 0,01266 | 0,01497 | 0,01602 | 0,01686 | 0,01826 | 0,01965 |
| 2000 tr/min | 0,00225 | 0,00503 | 0,00730 | 0,00850 | 0,01125 | 0,01489 | 0,01823 | 0,01978 | 0,02131 | 0,02310 | 0,02407 | 0,02690 |
| 2250 tr/min | 0,00422 | 0,00590 | 0,00940 | 0,01165 | 0,01602 | 0,02043 | 0,02268 | 0,02514 | 0,02796 | 0,02988 | 0,03120 | 0,03330 |
| 2500 tr/min | 0,00606 | 0,00850 | 0,01247 | 0,01706 | 0,01960 | 0,02501 | 0,02767 | 0,03090 | 0,03330 | 0,03470 | 0,03610 | 0,03900 |
| 2750 tr/min | 0,00612 | 0,01110 | 0,01650 | 0,02030 | 0,02460 | 0,03047 | 0,03443 | 0,03580 | 0,03780 | 0,04090 | 0,04160 | 0,04630 |
| 3000 tr/min | 0,00780 | 0,01288 | 0,01845 | 0,02480 | 0,03050 | 0,03760 | 0,04192 | 0,04468 | 0,04745 | 0,05066 | 0,05178 | 0,05430 |
| 3250 tr/min | 0,01279 | 0,01870 | 0,02537 | 0,02955 | 0,03584 | 0,04441 | 0,04793 | 0,05456 | 0,05645 | 0,05803 | 0,05929 | 0,06140 |
| 3500 tr/min | 0,01669 | 0,02337 | 0,02995 | 0,03447 | 0,04611 | 0,05340 | 0,05829 | 0,06164 | 0,06545 | 0,06650 | 0,06850 | 0,06970 |
| 4000 tr/min | 0,02080 | 0,03150 | 0,03648 | 0,04883 | 0,05670 | 0,06334 | 0,06760 | 0,07059 | 0,07446 | 0,08347 | 0,08905 | 0,09549 |

Débit de HC en g/s. Alimentation au E85

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1000 tr/min | 0,00098 | 0,00140 | 0,00204 | 0,00283 | 0,00398 | 0,00499 | 0,00556 | 0,00659 | 0,00700 | 0,00723 | 0,00741 | 0,00770 |
| 1250 tr/min | 0,00145 | 0,00156 | 0,00330 | 0,00540 | 0,00696 | 0,00888 | 0,00890 | 0,01109 | 0,00949 | 0,01001 | 0,01030 | 0,01050 |
| 1500 tr/min | 0,00214 | 0,00305 | 0,00626 | 0,00840 | 0,01046 | 0,01090 | 0,01368 | 0,01176 | 0,01241 | 0,01290 | 0,01316 | 0,01338 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1750 tr/min | 0,00292 | 0,00652 | 0,00853 | 0,01112 | 0,01260 | 0,01331 | 0,01391 | 0,01488 | 0,01530 | 0,01565 | 0,01645 | 0,01620 |
| 2000 tr/min | 0,00350 | 0,00985 | 0,01064 | 0,01401 | 0,01584 | 0,01569 | 0,01703 | 0,01765 | 0,01823 | 0,01923 | 0,01949 | 0,02031 |
| 2250 tr/min | 0,00450 | 0,00696 | 0,01288 | 0,01678 | 0,01722 | 0,01915 | 0,02001 | 0,02081 | 0,02171 | 0,02256 | 0,02341 | 0,02375 |
| 2500 tr/min | 0,00693 | 0,01036 | 0,01425 | 0,01824 | 0,02066 | 0,02185 | 0,02294 | 0,02418 | 0,02549 | 0,02530 | 0,02712 | 0,02894 |
| 2750 tr/min | 0,01392 | 0,01594 | 0,01931 | 0,02162 | 0,02336 | 0,02481 | 0,02644 | 0,02730 | 0,02791 | 0,02836 | 0,03189 | 0,03352 |
| 3000 tr/min | 0,01455 | 0,01717 | 0,02023 | 0,02322 | 0,02635 | 0,02828 | 0,02931 | 0,03031 | 0,03097 | 0,03326 | 0,03542 | 0,03690 |
| 3250 tr/min | 0,01716 | 0,02093 | 0,02420 | 0,02605 | 0,02957 | 0,03128 | 0,03254 | 0,03342 | 0,03607 | 0,03713 | 0,03879 | 0,04072 |
| 3500 tr/min | 0,01846 | 0,02421 | 0,02693 | 0,02889 | 0,03289 | 0,03432 | 0,03558 | 0,03870 | 0,03791 | 0,04200 | 0,04316 | 0,04447 |
| 4000 tr/min | 0,01971 | 0,02837 | 0,03105 | 0,03585 | 0,03767 | 0,04355 | 0,04361 | 0,04979 | 0,05000 | 0,05168 | 0,05786 | 0,06127 |

Débit de NO en g/s. Alimentation au E85

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1000 tr/min | 0,00033 | 0,00068 | 0,00154 | 0,00379 | 0,00774 | 0,01080 | 0,01173 | 0,01947 | 0,02461 | 0,02917 | 0,03395 | 0,03926 |
| 1250 tr/min | 0,00054 | 0,00219 | 0,00321 | 0,00656 | 0,00953 | 0,01275 | 0,01750 | 0,02210 | 0,02596 | 0,03477 | 0,04064 | 0,04379 |
| 1500 tr/min | 0,00097 | 0,00251 | 0,00536 | 0,00804 | 0,01024 | 0,01900 | 0,02200 | 0,02640 | 0,03375 | 0,04090 | 0,04492 | 0,04896 |
| 1750 tr/min | 0,00202 | 0,00455 | 0,00673 | 0,00914 | 0,01540 | 0,02167 | 0,02543 | 0,03395 | 0,03850 | 0,04510 | 0,05278 | 0,05706 |
| 2000 tr/min | 0,00235 | 0,00559 | 0,00863 | 0,01528 | 0,01842 | 0,02381 | 0,03292 | 0,03812 | 0,04325 | 0,05150 | 0,05539 | 0,06223 |
| 2250 tr/min | 0,00330 | 0,00520 | 0,01040 | 0,01623 | 0,02050 | 0,02984 | 0,03554 | 0,04134 | 0,04856 | 0,05624 | 0,06204 | 0,06760 |
| 2500 tr/min | 0,00443 | 0,00674 | 0,01134 | 0,01803 | 0,02390 | 0,03247 | 0,03860 | 0,04655 | 0,05360 | 0,06050 | 0,06714 | 0,07440 |
| 2750 tr/min | 0,00473 | 0,00900 | 0,01320 | 0,02091 | 0,02957 | 0,03618 | 0,04482 | 0,05001 | 0,05657 | 0,06325 | 0,07281 | 0,07826 |
| 3000 tr/min | 0,00542 | 0,00867 | 0,01406 | 0,02170 | 0,03300 | 0,04174 | 0,04695 | 0,05238 | 0,06340 | 0,06887 | 0,07868 | 0,08200 |
| 3250 tr/min | 0,00746 | 0,01240 | 0,01913 | 0,02411 | 0,03421 | 0,04361 | 0,04928 | 0,05862 | 0,06730 | 0,07643 | 0,07979 | 0,08421 |
| 3500 tr/min | 0,00783 | 0,01251 | 0,02131 | 0,02645 | 0,03967 | 0,04530 | 0,05520 | 0,06517 | 0,07298 | 0,08004 | 0,08710 | 0,09000 |
| 4000 tr/min | 0,00986 | 0,01795 | 0,02600 | 0,03447 | 0,03991 | 0,05061 | 0,06135 | 0,06818 | 0,07890 | 0,09435 | 0,09802 | 0,10715 |

Débit de carburant en g/s. Alimentation au E85

| | 9 Nm | 17 Nm | 25 Nm | 34 Nm | 42 Nm | 51 Nm | 59 Nm | 67 Nm | 76 Nm | 84 Nm | 93 Nm | 101 Nm |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1000 tr/min | 0,23914 | 0,30358 | 0,37442 | 0,47693 | 0,58181 | 0,64761 | 0,75131 | 0,79705 | 0,87297 | 0,93661 | 0,99936 | 1,07246 |
| 1250 tr/min | 0,29957 | 0,37980 | 0,49412 | 0,62043 | 0,70550 | 0,81806 | 0,91250 | 1,01902 | 1,02149 | 1,16195 | 1,26036 | 1,31703 |
| 1500 tr/min | 0,37433 | 0,49350 | 0,63120 | 0,72938 | 0,82919 | 0,98889 | 1,09222 | 1,13193 | 1,26209 | 1,39021 | 1,46737 | 1,54799 |
| 1750 tr/min | 0,49254 | 0,63559 | 0,73236 | 0,86136 | 1,02778 | 1,15946 | 1,20503 | 1,37032 | 1,45901 | 1,54097 | 1,75131 | 1,84429 |
| 2000 tr/min | 0,58178 | 0,73509 | 0,86075 | 1,04451 | 1,15147 | 1,24896 | 1,44429 | 1,55139 | 1,65553 | 1,85656 | 1,92040 | 2,12827 |
| 2250 tr/min | 0,63523 | 0,73694 | 0,98184 | 1,15935 | 1,25848 | 1,47931 | 1,60410 | 1,72701 | 1,88058 | 2,05060 | 2,18884 | 2,31196 |
| 2500 tr/min | 0,73766 | 0,80390 | 1,04381 | 1,26323 | 1,41769 | 1,63563 | 1,77532 | 1,95268 | 2,15921 | 2,33290 | 2,46869 | 2,62974 |
| 2750 tr/min | 0,84010 | 1,04477 | 1,26348 | 1,41529 | 1,65032 | 1,80914 | 2,01125 | 2,13076 | 2,34091 | 2,52010 | 2,69929 | 2,87847 |
| 3000 tr/min | 0,94254 | 1,04535 | 1,26233 | 1,50684 | 1,81943 | 2,03733 | 2,16735 | 2,29701 | 2,58453 | 2,72080 | 3,06936 | 3,23615 |
| 3250 tr/min | 1,03827 | 1,26035 | 1,50364 | 1,66018 | 1,92623 | 2,18951 | 2,33202 | 2,49745 | 2,79794 | 2,98974 | 3,19742 | 3,51794 |
| 3500 tr/min | 1,07955 | 1,34942 | 1,65498 | 1,81777 | 2,19471 | 2,34424 | 2,61411 | 2,85886 | 3,06856 | 3,30678 | 3,53400 | 3,67678 |
| 4000 tr/min | 1,27231 | 1,66323 | 1,83114 | 2,20654 | 2,36423 | 2,66706 | 2,94725 | 3,18846 | 3,44805 | 3,95047 | 4,09899 | 4,38187 |

ANNEXE 4

Influence de l'avance à l'allumage et du rapport volumétrique sur les émissions polluantes

Comparaisons établies par rapport à l'octane pour le cycle US06

| | Octane Référence | E85 | Écart % | E85 Avance optimisée | Écart % | Gain % | E85 Avance et Rapport volumétrique optimisés | Écart % | Gain % |
|----------------------|---------------------|--------|------------|----------------------------|------------|-----------|---|------------|-----------|
| Conso L/100 km | 7,900 | 11,300 | 43 | 11,300 | 43 | 0 | 11,000 | 39 | 4 |
| CO (g/km) | 0,396 | 0,157 | -60 | 0,156 | -61 | 0 | 0,099 | -75 | 15 |
| HC (g/km) | 0,249 | 0,175 | -30 | 0,160 | -36 | 6 | 0,201 | -19 | -11 |
| Nox (g/km) | 0,435 | 0,172 | -60 | 0,187 | -57 | -3 | 0,185 | -57 | -3 |

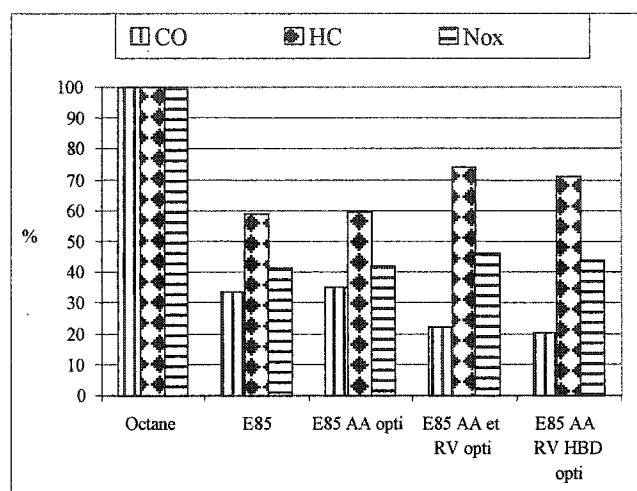
Comparaisons établies par rapport à l'octane pour le cycle FTP

| | Octane Référence | E85 | Écart % | E85 Avance optimisée | Écart % | Gain % | E85 Avance et Rapport volumétrique optimisés | Écart % | Gain % |
|----------------------|---------------------|-------|------------|----------------------------|------------|-----------|---|------------|-----------|
| Conso L/100 km | 6,100 | 8,800 | 44 | 8,600 | 41 | 3 | 8,700 | 43 | 2 |
| CO (g/km) | 0,193 | 0,065 | -66 | 0,068 | -65 | -2 | 0,043 | -78 | 11 |
| HC (g/km) | 0,170 | 0,100 | -41 | 0,101 | -41 | -1 | 0,126 | -26 | -15 |
| NOx (g/km) | 0,262 | 0,108 | -59 | 0,110 | -58 | -1 | 0,121 | -54 | -5 |

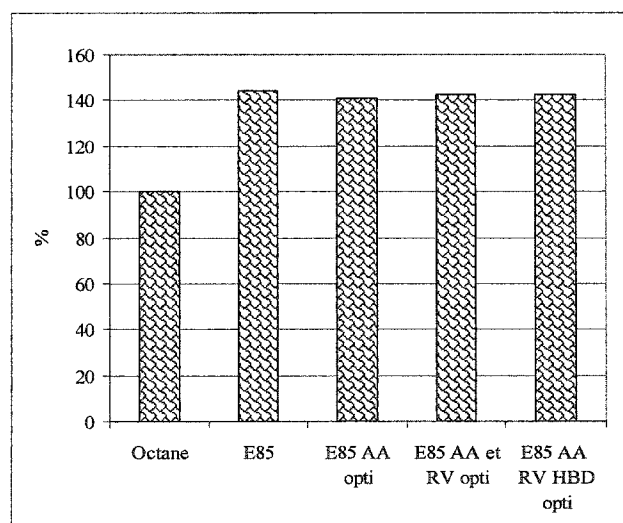
ANNEXE 5

Émissions et consommation de carburant lors des modifications successives du véhicule sur le cycle FTP

Variation des émissions polluantes lors des modifications du véhicule. Comparaisons établies par rapport à l'octane.



Variation de la consommation de carburant lors des modifications du véhicule



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Benoit, L. (1996). *Technologie des injections électroniques et performances moteur* (ETAI ed., pp. 75).
- Bitsche, O., & Gutmann, G. (2004). Systems for hybrid cars. *Paper presented at the Eight Ulmer Electrochemische Tage*, Jun 20-21 2002, Neu-Ulm, Germany.
- Borette, A., Cantore, G., Mattarelli, E., & Borghi, M. (1996). Numerical optimization of a racing engine with variable intake and exhaust geometry and valve actuation. *Article SAE 962542*.
- Bosch_GmbH. (1989). Conditions de fonctionnement et émissions. *Cahier Technique. Technique des gaz d'échappement des moteurs à essence* (pp. 7).
- Bronson-Consulting-Group. (2004). *The impacts of low-level ethanol blended gasoline use on drivability and vehicular components of on -road vehicles*, texte inédit, rapport préliminaire. Transport Canada.
- Buchmann, I. (2001). *Batteries in a portable world* (2 ed.).
- Chum, H. L., & Overend, R. P. (2001). Biomass and renewable Fuels. *Fuel processing Technology*, 71, 187-195.
- Ciocci, F., Noceti, D., & Bradamante, E. (1998). Intake system analysis of the 550 Maranello using the Wave code. *Paper presented at the Ricardo Software International User Conference*, Detroit.
- Clemente, R. C., Werninghaus, E., Coelho, E. P. D., & Ferraz, L. A. (2001). Development of an internal combustion alcohol fuelled engine. *Article SAE 2001-01-3917*.
- Dai, W., Cheemalamarri, S., Curtis, E. W., Boussarsar, R., & Morton, R. K. (2003). Engine Cycle Simulation of Ethanol and Gasoline Blends. *Article SAE 2003-01-3093*.
- Diesel-net. *Emission test cycle*, [En ligne]. <http://www.dieselnat.com/standards/cycles/> (consulté le 18 juin 2004)
- Duoba, M., & Larsen, B. (2000). In-situ mapping and analysis of the Toyota Prius HEV engine. *Article SAE 2000-01-3096*.

El-Emam, S. H., & Desoky, A. A. (1984). A study on the combustion of alternative fuels in Spark-ignition Engines. *International Journal Hydrogen Energy*, 10 (7/8), 497-504.

Environnement-Canada. *The evaluation of ethanol-gasoline blends on vehicle exhaust and evaporative emissions. Phase 1*. Rapport non publié. Environnement Canada. Environmental Technology Centre.

EurObserv'ER. (2004). Le baromètre des biocarburants. *Systèmes solaires*, 161, 53-65.

Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (2001). *Internal Combustion Engines* (2 ed.): Wiley.

Gardiner, D. P., Mallory, R. W., Pucher, G. R., Todesco, M. K., Bardon, M. F., Markel, T. J., et al. (1999). Improving the fuel efficiency of light-duty ethanol vehicles-an engine dynamometer study of dedicated engine strategies. *Article SAE 1999-01-3568*.

Guibet, J. C. (1981). Utilisation de produits organiques oxygénés comme carburants et combustibles dans les moteurs. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 36(5), 527-559.

Guibet, J. C., & Faure, E. (1997). *Carburants et Moteurs Tome 1 et Tome2* (Vol. 1) Éditions Technip.

Guibet, J. C., & Faure-Birchem, E. (1999). Technology, energy, environment. Technip (Ed.), *Fuels and Engines* (Vol. 2, pp. 590-601), Institut Français du Pétrole.

Halvorsen, K. C. (1998). The necessary components of a dedicated ethanol vehicle. Mémoire de maîtrise.

Heather L. MacLean, L. B. L., W. Michael Griffin,. (2004). Alternative transport fuels for the future. *International Journal of Vehicle Design*, 35(1-2).

Hetherington, P., Hill, W., Pan, F., Snider, B., Cerrato-Jay, G., & Bradama, E. (1999). Simulating odd fire V10 exhaust noise for sound quality evaluation. *Article SAE 1999-01-1652*.

Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals* (McGraw-Hill ed.).

Ho, S., Amlee, D., & Johns, R. (1996). A comprehensive knock model for application in gas engines. *Article SAE 961938*.

Hoogers, G. (2003). *Fuel Cell Technology Handbook*, Chap 11 Competing Technologies for Transportation. American Technical Publishers.

Hsieh, W. D., Chen, R. H., Wu, T. L., Lin, T. H., (2002). Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment*, 36, 403-410.

Hu, Z., Pu, G., Fang, F., & Wang, C. (2004). Economics, environment, and energy life cycle assessment of automobiles fuelled by bio-ethanol blends in China. *Renewable Energy*, 29(14), 2183-2192.

Jackson-Racing.[En ligne]. www.jacksonracing.com (consulté le 8 mars 2004)

Jefferson, C. M., & Barnard, R. H. (2002). *Hybrid Vehicle Propulsion* (WIT Press ed. Vol. 10).

Johnson, V. H., Wipke, K. B., & Rausen, D. J. (2000). HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emission. *Article SAE 2000-01-1543*.

Kahn Ribeiro, S., & Staib Younes-Ibrahim, P. (2001). Global warming and transport in Brazil - Ethanol alternative. *International Journal of Vehicle Design*, 27 (1-2-3).

Kelly, J. K., & Rajagopalan, A. (2001). *Benchmarking of EOM hybrid electric vehicle at NREL*. [En ligne]. (consulté le 20 avril 2005)
http://www.ctts.nrel.gov/analysis/pdfs/fy01_benchmark_milestone.pdf

Kenneth, J. K., Mihalic, M., & Zolot, M. (2002) Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing. *Paper presented at The Seventeenth Annual Battery Conference on Application and Advances*. Long beach, California, USA

Krotscheck, C., Konig, F., & Obernberger, I. (2000). Ecological assessment of integrated bioenergy systems using the sustainable process index. *Biomass and energy*, 18, 341-368.

Lave, L. B., MacLean, H. L., Hendrickson, C., & Lankey, R. (2000). Life cycle Analysis of alternative Automobile Fuel /Propulsion Technologies. *Environnemental Science and Technology*, 34, 3598-3605.

Liguang, L., Zhimin, L., Wang, H., Deng, B., Xiao, Z., Wang, Z., et al. (2003). Combustion and emissions of ethanol fuel (E100) in a small SI Engine. *Article SAE 2003-01-3262*.

MacLean, H. L., & Lave, L. B. (2003). Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 1-69.

MacLean, H. L., & Lave, L. B. (2003). Life cycle assessment of automobile. Fuel options. *Environmental Science & Technology*, 37(23).

Marinov, N. M. (1999). A detailed chemical kinetic model for high temperature ethanol oxidation. *International Journal chemical kinetic*, 31(3), 183-220.

Markel, T., Brooker, A., Hendricks, T., Johnson, V., Kelly, K., Kramer, B., et al. (2002). ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modelling. *Journal of power sources*, 110(2), 255-266.

Mattarelli, E., Valentini, A., & Pivetti, G. (1998). Modelling high performance turbocharged SI engine. *Article SAE 98304*.

Millo, F., Gallone, A., & Mallamo, A. (1999). Experimental and computation analysis of a tuned exhaust system for a small two stroke engine. *Article SAE 1999-01-3327*.

Min, B., Larsen, R., Duoba, M., Ng, H., & Larsen, B. (2003). Direct Measurement of Power train Component Efficiencies for a light-duty Vehicle with a CVT operating over a Driving Cycle. *Article SAE 2003-01-3202*.

Ministère de l'environnement du Québec. (2003). *Contexte, enjeux et orientation sur la mise en oeuvre du protocole de Kyoto*. [En ligne]. (consulté le 14 juin 2004)
<http://www.menv.gouv.qc.ca/changements/kyoto/Contexte/contexte-enjeux.pdf>,

Muta, K., Yamazaki, M., & Tokieda, J. (2004). Development of new generation hybrid system THS II. Drastic Improvement of power performance and fuel economy. *Article SAE 2004-01-0064*.

Osborne, R. (1999). Concurrent Wave / Matlab simulink simulation applied to HSDI ECU calibration. *Paper presented at the Ricardo Software International User Conference*, Detroit.

Otte, C., Meyer, M., Halverson, S., Bannick, E., Workman, B., Dick, M., et al. (2000). The newest silverado : A production feasible ethanol (E85). Conversion by the university of Nebraska-Lincoln. *Article SAE*.

Panasonic corp. (1999). *Panasonic sealed lead acid batteries*. Technical Handbook.

Pimentel, D. (2003). Ethanol fuels: Energy balance, economics, and environment Impacts are negative. *Natural Resources Research*, 12(2).

Rand, D., & Woods, R. (1998). *Batteries for electric vehicles*. Research studies press book

Sagar, A., D. (1995). Automobiles and global warming: alternative fuels and other options for carbon dioxide emissions reduction. *Environnemental Impact Assessment Revue*, 15, 241-274.

Shapouri, H., Duffield, J. A., & Wang, M. (2002). The energy balance of corn ethanol: An update Report N 814: United State Dept. of Agriculture.

Sinor, J. E., & Bailey, B. K. (1993). Current and potential future performance of ethanol fuels. *Paper presented at the SAE International Congress and Exposition*, Mar 1-5 1993, Detroit, MI, USA.

Société de Transport de Montréal. (2003). *Mémoire préparé dans le cadre de la mise en œuvre du protocole de Kyoto au Québec*. [En ligne]. <http://www.stm.info/en-bref/aud-kyoto.htm>, (consulté le 21 avril 2005)

Sodré, J. R., & Yates, D. A. (1996). Chromatograph Determination of Unburned Fuel Concentration in the Exhaust of a SI Engine. *Article SAE 962370*

Taylor, A. B., Moran, D. P., Bell, A. J., Hodgson, N. G., Myburghand, I. S., & Botha, J. J. (1996). Gasoline / alcohol blends : exhaust emissions, performance and burn-rate in a multi-valve production engine. *Article SAE 961988*.

Toyota Corp. [En ligne]. <http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/ths2/hybrid.html> (consulté le 11 octobre 2004)

Ville de Montréal. (1998). Enquête. [En ligne] (consulté le 10 avril 2004). http://www2.ville.montreal.qc.ca/urb_demo/atlas/deplacements/tableau.pdf.

Wang, M. Q. (1999). Fuel-cycle greenhouse gas emissions. Impacts of alternative transportation fuels and advanced vehicle technologies. *Transportation Research Record*, 1664, 9-17.

Watson, H. (1996). Spark ignition automotive fuels: potential and problems of some oxygenated extenders. *Journal of Vehicule Design*, 17(5/6) , 608-625.